



TUGAS AKHIR - TM 091585

**PENGARUH SISTEM INJEKSI BERTINGKAT
TERHADAP UNJUK KERJA MESIN DIESEL
DIAMOND TYPE Di 800 MENGGUNAKAN BAHAN
BAKAR BIODIESEL MINYAK JELANTAH**

AGUS SUPRADIAN
NRP.2114 105 059

Dosen Pembimbing
Dr. Bambang Sudarmanta, ST.,MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
SURABAYA
2017



TUGAS AKHIR - TM 091585

**PENGARUH SISTEM INJEKSI BERTINGKAT
TERHADAP UNJUK KERJA MESIN DIESEL
DIAMOND TYPE Di 800 MENGGUNAKAN BAHAN
BAKAR BIODIESEL MINYAK JELANTAH**

AGUS SUPRADIAN
NRP. 2114 105 059

Dosen Pembimbing
Dr. Bambang Sudarmanta, ST.,MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
SURABAYA
2017



FINAL PROJECT - TM 091585

***MULTIPLE INJECTION SYSTEM EFFECTS ON
THE PERFORMANCE OF DIESEL ENGINE
DIAMOND TYPE Di 800 USING BIODIESEL
FUEL OF USED COOKING OIL***

AGUS SUPRADIAN
NRP. 2114 105 059

Supervisor:
Dr. Bambang Sudarmanta, ST.,MT.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2017

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH SISTEM INJEKSI BERTINGKAT TERHADAP UNJUK KERJA MESIN DIESEL DIAMOND TYPE Di 800 MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR BIODIESEL MINYAK JELANTAH

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Konversi Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

AGUS SUPRADIAN

NRP. 2114105059

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas/Akhir:

1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT. (Pembimbing)
NIP. 197301161997021001
2. Ary Bachtiar K. P., ST, MT, PhD. (Penguji I)
NIP. 197105241997021001
3. Nur Ikhwan ST, M.Eng. (Penguji II)
NIP. 196709151995121001
4. Bambang Arip D., ST, M.Eng., PhD. (Penguji III)
NIP. 197105241997021001

SURABAYA

Januari, 2017

**PENGARUH SISTEM INJEKSI BERTINGKAT
TERHADAP UNJUK KERJA MESIN DIESEL
DIAMOND TIPE Di 800 MENGGUNAKAN BAHAN
BAKAR BIODIESEL MINYAK JELANTAH**

Nama Mahasiswa : Agus Supradian
NRP : 2114105059
Jurusan : Teknik Mesin FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT

ABSTRAK

Biodiesel merupakan bahan bakar yang berasal dari minyak nabati sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar yang terbarukan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh sistem injeksi bertingkat terhadap karakteristik semprotan dan unjuk kerja menggunakan bahan bakar biodiesel minyak jelantah.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental yang menggunakan bahan bakar biodiesel minyak jelantah dengan prosentase volumetric 100% (B100) dengan mengaplikasikan injektor solenoid pada mesin diesel empat langkah Diamond tipe Di 800. Pengujian ini dilakukan dengan injeksi bertingkat pada variasi 100%-0%, 70% - 30%, 50% -50%, dan 30% -70% diatur oleh ECU programmable. Pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar yang berada di Teknik Mesin FTI ITS Surabaya. Penelitian diawali dengan proses pembuatan biodiesel minyak jelantah dan pengujian properti karakteristik biodiesel sebelum dilakukannya pengujian pada mesin diesel. Kemudian, dilakukan pengujian unjuk kerja dan emisi gas buang pada putaran konstan (2000 rpm), pengambilan data

pada pembebanan 500 Watt sampai 4.000 Watt dengan interval 500 Watt.

Data yang didapatkan dengan menggunakan sistem injeksi bertingkat pada variasi 30%-70% terhadap injeksi single fuel menghasilkan penurunan SFC sebesar 6,36% dan emisi gas buang NOx sebesar 9%. Meskipun diikuti penurunan daya efektif, torsi, BMEP sebesar 10,91%, sedangkan suhu operasional mesin meliputi : temperatur gas buang, mesin, pendingin juga mengalami penurunan sebesar 18,56%, 1,25% dan 1,35%.

Kata kunci: *Injeksi bertingkat, Biodiesel Minyak Jelantah, Mesin Diesel, SFC dan temperatur gas buang*

MULTIPLE INJECTION SYSTEM EFFECTS ON THE PERFORMANCE OF DIESEL ENGINE DIAMOND TYPE Di 800 USING BIODIESEL FUEL OF USED COOKING OIL

Name : Agus Supradian
NRP : 2114105059
Major : Mechanical Engineering FTI - ITS
Supervisor : Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT

ABSTRACT

Biodiesel is a fuel derived from vegetable oil that can be used as a renewable fuel source. The objective of this research is aimed to determine the effect of stratified injection system on the sprays characteristics and performance using biodiesel fuel of used cooking oil.

This research was carried out experimentally using biodiesel fuel of used cooking oil with volumetric percentage of 100% (B100) by applying a solenoid injectors in four steps diesel engine diamond type Di 800. The test was performed by multiple injection on the variation of 100% - 0%, 70% - 30%, 50% - 50%, and 30% - 70% regulated by a programmable ECU. Tests conducted at the Laboratory of Combustion Engineering and Fuels in Mechanical Engineering FTI ITS Surabaya. The study began with the making of used cooking oil biodiesel and testing of the characteristics properties of biodiesel before testing on the diesel engines. The research continued by testing the performance and emissions of exhaust at a constant speed (2000 rpm), collecting data on the loading of 500 Watt to 4,000 Watt with 500 Watt intervals.

It is known that the multiple injection system on the variation of 30% -70% of a single fuel injection produced a decrease in SFC at 6,36% and NOx emissions of exhaust at 9%. Despite followed by the decreased of effective power, torque, BMEP of 10.91%, while the operating temperature of the engine include: exhaust gas temperature, engine coolant is also decreased by 18,56%, 1,25% and 1,35%.

Keywords: Multiple injection, biodiesel of used cooking oil, diesel engine, SFC and exhaust gas temperature

KATA PENGANTAR

Ucapan syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kepada Allah SWT, atas berkat rahmat serta karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul **‘PENGARUH SISTEM INJEKSI BERTINGKAT TERHADAP UNJUK KERJA MESIN DIESEL DIAMOND TYPE Di 800 MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR BIODIESEL MINYAK JELANTAH’**.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin ITS Surabaya, sesuai dengan kurikulum yang telah ditetapkan. Selain itu Tugas Akhir ini juga merupakan suatu bukti yang diberikan alhamdulillah dan masyarakat.

Penulis menyadari bahwa keberhasilan penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak baik langsung maupun tidak langsung. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Allah SWT dan junjungan besar Nabi Muhammad SAW.
2. Ayah, Ibu, kakak, serta saudara-saudaraku tercinta yang memberikan semangat dengan cinta dan kasih sayangnya yang tiada batas, serta doa dan restunya.
3. Dr.Bambang Sudarmanta, ST., MT.sebagai Dosen Pembimbing yang telah dengan sangat sabar, tidak bosan-bosannya membantu dan memberikan ide serta ilmu hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.

4. Dinny Harnany ST,MT selaku dosen wali yang telah banyak membantu dalam proses perwalian dan banyak memberi motivasi penulis.
5. Dosen tim penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini.
6. Segenap dosen jurusan Teknik Mesin, terima kasih atas pengetahuan yang telah diberikan. Serta karyawan Teknik Mesin ITS, khususnya Pak Karmono dan Mas Ridha Widianto.
7. Seluruh keluarga laboratorium teknik pembakaran dan bahan bakar yang telah menyediakan tempat, dan telah memberikan bantuan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini terutama lek Ucai selaku kepala suku Lab serta seluruh keluarga Lintas Jalur Teknik Mesin semoga kita sukses bersama
8. Moya Sari Tisna Viasanti, yang senantiasa menemani dan memberi semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Karena keterbatasan waktu dan kemampuan penulis, sebagai manusia biasa kami menyadari dalam penulisan ini masih terdapat beberapa kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, kami mengharap kritik dan saran membangun sebagai masukan untuk penulis dan kesempurnaan Tugas Akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan, mahasiswa Mesin pada khususnya.

Surabaya, Januari 2017

Agus Supradian

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Perumusan Masalah.....	4
I.3 Batasan Masalah.....	4
I.4 Tujuan Penelitian.....	4
I.5 Manfaat Penelitian.....	5
I.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Dasar Teori Mesin Diesel.....	7
2.1.1 Tahapan Pembakaran Mesin	7
2.2 Bahan Bakar Alternatif Diesel.....	10
2.2.1 Karakteristik Biodiesel.....	11
2.2.2 Pembuatan Biodiesel Minyak Jelantah.....	13
2.2.3 Karakteristik Minyak Jelantah.....	15
2.3 Definisi Dan Fungsi Injektor.....	19
2.3.1 Profil Udara Masuk Dan Laju Aliran Bahan Bakar Menurut Heywood.....	21
2.4 Karakteristik ECU Dan Karakteristik Injeksi Satu Tingkat Maupun DuaTingkat.....	22
2.4.1 Penerapan Teknologi Injeksi Bertingkat Pada Injektor Solenoid.....	24
2.4.2 Metoda Injeksi Bertingkat Dibandingkan Dari Penelitian	

Sebelumnya.....	25
2.4.3 Keunggulan Sistem Injeksi Bertingkat.....	26
2.4.4 Kekurangan Sistem Injeksi Bertingkat.....	26
2.5 Unjuk Kerja Mesin Diesel.....	27
2.5.1 Daya Efektif (N_e).....	27
2.5.2 Torsi (M_t).....	27
2.5.3 Tekanan efektif rata-rata (b_{mep}).....	28
2.5.4 Konsumsi bahan bakar spesifik (sfc).....	29
2.5.5 Efisiensi Thermis (η_{th}).....	30
2.6 Emisi Gas Buang.....	30
2.6.1 Emisi NO_x	30
2.7 Penelitian Terdahulu.....	32
BAB III METODE PENELITIAN.....	39
3.1 Proses Pembuatan Dan Alat Yang Digunakan Saat Pembuatan Biodiesel.....	39
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	44
3.2.1 Diagram Alir Injeksi Satu Tingkat.....	44
3.2.2 Diagram Alir Injeksi Bertingkat.....	45
3.3 Skema Peralatan.....	46
3.4 Peralatan Penelitian.....	46
3.5 Alat Ukur.....	50
3.6 Perencanaan Penelitian.....	54
3.6.1 Pengujian	54
BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISA.....	57
4.1 Pengambilan Data.....	57
4.2 Durasi Buka Injeksi Bahan Bakar Biodiesel Pada Mesin Diamond Type Di 800.....	57
4.3 Grafik Injeksi Satu Tingkat Dan Grafik Injeksi Bertingkat.....	58
4.4 Karakteristik Injeksi Bertingkat Pada Injektor Solenoid.....	61
4.5 Propertis Bahan Bakar Biodiesel Minyak Jelantah.....	63

4.6 Perhitungan Dan Analisa.....	64
4.6.1 Daya Efektif (N_e)	65
4.6.2 Torsi (M_t)	65
4.6.3 Brake Mean Effective Pressure (BMEP).....	66
4.6.4 Spesifik Fuel Consumption (S_{fc}).....	66
4.6.5 Effisiensi Thermal.....	67
4.6.6 Analisa Unjuk Kerja.....	68
a. Analisa Daya.....	68
b. Analisa Torsi.....	69
c. Analisa Efektif Rata-Rata (BMEP).....	70
d. Analisa Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC).....	71
e. Analisa Effisiensi Thermal (η_{th}).....	73
f. Analisa Temperatur Gas Buang.....	74
g. Analisa Temperatur Engine, Pelumas dan Pendingin.....	75
h. Emisi Gas Buang Nox.....	77
BAB V KESIMPULAN	79
5.1 Kesimpulan	79
5.2 Saran.....	80
DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN	83

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses 4 Langkah Mesin Diesel.....	7
Gambar 2.2	Tahapan Pembakaran Pada Mesin Diesel.....	8
Gambar 2.3	Diagram Alir Pembuatan Biodiesel.....	13
Gambar 2.4	Struktur injektor elektrik dan bagian dari injektor selenoid.....	20
Gambar 2.5	(a) Grafik Mass Flow Rate Udara Masuk dan Exhaust Terhadap Crank angle. (b) Fuel Mass Flow Rate.....	21
Gambar 2.6	(a) Karakteristik Injeksi Satu tingkat (b) Karakteristik Injeksi DuaTingkat.....	22
Gambar 2.7	Skema ECU.....	23
Gambar 2.8	Variasi Profil Injeksi Bertingkat Pada Mesin Diesel.....	25
Gambar 2.9	Hubungan pengaruh tipe injeksi terhadap NOx dan Particulate.....	32
Gambar 2.10	Effect of injection strategies on the combustion characteristics in low compression ratio engine.....	33
Gambar 2.11	Particulate vs NOx for load baseline single and multiple injection.....	34
Gambar 2.12	Produksi NOX terhadap derajat engkol dan tipe injeksi.....	35
Gambar 2.13	(a) Grafik Temperatur Engine Terhadap Beban. (b) Grafik Temperatur Oli Terhadap Beban (c) Grafik Temperatur Pendingin Terhadap Beban.....	37
Gambar 3.1	Hasil Metoxide.....	40
Gambar 3.2	Hasil proses pemasakan.....	41
Gambar 3.3	Hasil Proses Pemisahan Crude Gliserin, Sedangkan Lapisan Atas Berwarna Bening, Crude BD.....	41
Gambar 3.4	Hasil Produksi Biodiesel.....	42
Gambar 3.5	Skema Peralatan Uji Unjuk Kerja.....	46

Gambar 3.6	Mesin Diesel Di 800.....	46
Gambar 3.7	Generator Daiho.....	47
Gambar 3.8	Injektor Standar Toyota Kijang Innova D4D..	48
Gambar 3.9	ECU DECS.....	48
Gambar 3.10	Sensor Crank.....	49
Gambar 3.11	ACCU Yuasa.....	49
Gambar 3.12	ACCU Charger.....	50
Gambar 3.13	Atten Digital Oscilloscope.....	50
Gambar 3.14	Iwaki Pyrex.....	51
Gambar 3.15	Amperemeter Dekco.....	51
Gambar 3.16	Voltmeter Dekco.....	52
Gambar 3.17	Casio Stopwatch.....	52
Gambar 3.18	Beban Lampu 4000 Watt.....	53
Gambar 3.19	Thermocouple Type-K.....	53
Gambar 3.20	Thermometer Digital.....	54
Gambar 4.1	Grafik Injeksi 100% Pada Mesin Diesel.....	58
Gambar 4.2	Grafik Injeksi 70%-30% Pada Mesin Diesel.	59
Gambar 4.3	Grafik Injeksi 50%-50% Pada Mesin Diesel.	59
Gambar 4.4	Grafik Injeksi 30%-70% Pada Mesin Diesel.	60
Gambar 4.5	Skema Profil Injeksi Bertingkat Pada Mesin Diesel.....	61
Gambar 4.6	Grafik Oscilloscope injeksi tunggal yang dihasilkan oleh ECU.....	62
Gambar 4.7	Grafik Oscilloscope injeksi 70%-30% yang dihasilkan oleh ECU.....	62
Gambar 4.8	Grafik Oscilloscope injeksi 50%-50% yang dihasilkan oleh ECU.....	63
Gambar 4.9	Grafik Oscilloscope injeksi 30%-70% yang dihasilkan oleh ECU.....	63
Gambar 4.10	Grafik Daya vs Beban.....	69
Gambar 4.11	Grafik Torsi vs Beban.....	70
Gambar 4.12	Grafik BMEP vs Beban.....	71
Gambar 4.13	Grafik SFC vs Beban.....	72
Gambar 4.14	Grafik Efisiensi Thermal vs Beban.....	73
Gambar 4.15	Grafik T.Gas Buang vs Beban.....	75

Gambar 4.16	Grafik T.Engine vs Beban.....	76
Gambar 4.17	Grafik T.pelumas vs Beban.....	77
Gambar 4.18	Grafik T.Pendingin vs Beban.....	77
Gambar 4.19	Grafik Nox Vs Beban.....	78

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Biodiesel dan Solar.....	17
Tabel 2.2	Indonesia Indonesian Biodiesel Standard SNI 04-7182-2006.....	18
Tabel 2.3	Macam-macam Propertis Biodisel.....	19
Tabel 3.1	Parameter-Parameter Eksperimen.....	56
Tabel 4.1	Properties Bahan Bakar Biodiesel B-100 Minyak Jelantah.....	64

DAFTAR SIMBOL

T	torsi, kg.cm
ω	kecepatan sudut, 1/s
n	frekuensi putaran, rpm
Ne	daya efektif, hp
z	konstanta pembagi
A	luasan piston, m ²
L	panjang langkah, m
m _{bb}	masa bahan bakar, kg
Q	nilai kalor bawah bahan bakar, btu/lb
P	daya listrik, Watt
V	tegangan listrik, Volt
I	arus listrik, Ampere
ρ	massa jenis, kg/m ³
<i>b_{mep}</i>	tekanan efektif rata-rata, kPa
sfc	konsumsi bahan bakar spesifik, kg/hp.jam

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bahan bakar fosil merupakan bahan bakar yang tidak dapat diperbarui, bahan bakar fosil ini keberadaannya sangat penting bagi kehidupan umat manusia seperti kebanyakan proses industri, transportasi, dan kebutuhan rumah tangga. Sehingga saat ini sangat dibutuhkan energi alternatif atau yang biasa disebut biodiesel yang merupakan pengganti bahan bakar minyak solar yang cadangannya terus berkurang dan kian menipis. Salah satunya adalah bahan bakar biodiesel dari minyak nabati yaitu menggunakan minyak jelantah bekas.

Banyak penelitian mengenai pemanfaatan bahan bakar biodiesel yang telah dilakukan terutama sejak terjadinya krisis energi tahun 1973. Namun bahan bakar biodiesel yang kini ada masih memiliki kekurangan, beberapa kesimpulan dari banyak penelitian yang berkaitan dengan penggunaan bahan bakar biodiesel seperti yang terdapat pada *The Biodiesel Handbook* oleh Knothe Gerhard, et al [1] adalah sebagai berikut :

- Emisi gas buang nitrogen oksida (NO_x) umumnya meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi biodiesel dibandingkan bahan bakar solar.
- Emisi gas buang, hidrokarbon (HC) dan *karbon monoksida* (CO) yang tidak terbakar umumnya menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi biodiesel dibandingkan bahan bakar solar.
- Konsumsi bahan bakar meningkat pada penggunaan bahan bakar biodiesel dibandingkan bahan bakar solar seiring dengan nilai kalor atau kandungan energi yg lebih rendah pada bahan bakar biodiesel.

Untuk mengurangi emisi gas buang NO_x ini dan untuk menurunkan nilai Sfc, diperlukan suatu treatment pada mesin diesel. Treatment pada saat pembakaran terjadi salah satunya adalah pengontrolan semprotan pada injection nozzle. Pada kondisi standar, mesin diesel menggunakan sistem injeksi single dengan sekali semprotan bahan bakar dalam satu siklus kerja. Injeksi bahan bakar ini bisa dimodifikasi menjadi sistem injeksi bertingkat sehubungan untuk mengurangi emisi gas buang terutama NO_x dan akan menurunkan nilai Sfc. Formasi NO_x akan terbentuk pada temperatur yang tinggi dan tekanan yang tinggi pada proses pembakaran sehingga untuk mengurangi NO_x injeksi digunakan bertingkat agar tekanan dan temperatur puncak tidak tinggi sehingga nilai Sfc juga turun, namun hal ini akan berakibat pada turunnya daya dan performa pada mesin diesel.

Beberapa kesimpulan dari banyak penelitian yang berkaitan dengan penggunaan bahan bakar biodiesel seperti yang terdapat pada Suh, Hyun Kyu [2] melakukan eksperimen terhadap mesin diesel dengan rasio kompresi rendah menggunakan injeksi bertingkat dengan nilai reduksi NO_x 58.7% dan soot 25%. Pada eksperimen tersebut didapatkan data bahwa injeksi bertingkat menurunkan tekanan puncak pada proses pembakaran dan menurunkan rata-rata kalor yang dilepas sehinggadaya yang didapat turun namun efektif dalam proses menurunkan emisi.

Nehmer dan Reitz [3] juga melakukan eksperimen untuk mencari efek dari sistem injeksi bertingkat terhadap emisi soot dan NO_x menggunakan mesin diesel Caterpillar silinder tunggal. Mereka memvariasikan jumlah total bahan bakar pada injeksi tahap pertama dari 10%-75% persen dari jumlah total bahan bakar yang diinjeksikan. Mereka menemukan bahwa terjadi pengurangan emisi NO_x dan soot.

Bambang S, et all [4] melakukan eksperimen terhadap mesin diesel Diamond tipe Di 800 pada ruang bakar torodial

yang dikontrol oleh mekanisme ECU untuk pengaturan waktu dan durasi injeksi. Pengujian yang dilakukan dengan sistem injeksi bertingkat dengan putaran konstan menggunakan generator dengan lampu sebagai beban. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada sistem injeksi bertingkat efektif menurunkan SFC dan emisi gas buang, meskipun diikuti dengan penurunan daya. Secara spesifik penurunan daya dan SFC terjadi pada moda 25%-75% yaitu sebesar 6,36% dan 32,22%, sedangkan untuk suhu operasional yang terdiri dari suhu gas buang, *engine*, oli pelumas dan sistem pendinginan juga mengalami penurunan sebesar 7,97%, 2,13%, 1,29% dan 1,17% dibandingkan sistem injeksi tunggal.

M. Mujib S [5] melakukan eksperimen dengan bahan bakar biodiesel kemiri sunan dengan perubahan *camshaft fuel pump* menggunakan mesin *diamond type Di 800*. Dengan injeksi bertingkat pada 75%-25%, dengan penggantian *camshaft bosch pump* 1 kali pemompaan dan 2 kali pemompaan. Hasil terbaik yang didapatkan dari unjuk kerja dengan menggunakan sistem injeksi bertingkat 75%-25% pada daya efektif, torsi, bmep dan efisiensi yang dihasilkan modif 2 mengalami kenaikan rata-rata sebesar 6,71%, 6,71%, 6,71% dan 34,2% terhadap standar 1, sedangkan pada Sfc mengalami penurunan rata-rata 16,7%. Adapun hasil terbaik dari pengukuran temperatur pada exhaust dan oli adalah modif 2 mengalami penurunan rata-rata sebesar 3,7% dan 6,1%, sedangkan pada temperatur engine dan pendingin adalah standar 2 mengalami penurunan rata-rata sebesar 2,65%, 3,01% terhadap standar 1.

Pada penelitian ini akan dilakukan eksperimen terhadap mesin diesel silinder tunggal yang dirubah sistem injeksinya dengan mengganti injektor solenoid dengan sistem injeksi bertingkat sehingga dapat divariasikan dan dirubah dengan variasi 70%-30%, 50%-50% dan 30%-70% menggunakan ECU. Berdasarkan inputan berupa sensor posisi poros engkol

yaitu pulser dan switch selector sebagai tombol pemilih variasi injeksi dan accu sebagai sumber tegangan listrik. Pada penelitian ini akan digunakan biodiesel minyak jelantah yang kemudian dapat diketahui bagaimana efeknya terhadap (daya, torsi, bmep, efisiensi thermis dan nilai Sfc yang akan dihasilkan) sehingga pembentukankadar-kadar polutan emisi gas buang terutama Nox dapat direduksi.

1.2 Perumusan Masalah

Bagaimana pengaruh perubahan sistem injeksi satu tingkat dan injeksi bertingkat dengan variasi 70%-30%, 50%-50% , 30%-70% menggunakan bahan bakar biodiesel minyak jelantah terhadap unjuk kerja mesin diesel.

1.3 Batasan Masalah

Pada Tugas Akhir ini diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Percobaan menggunakan mesin diesel 1 silinder empat langkah *Diamond* tipe Di 800 yang dimodifikasi pada bagian injektor agar injeksi dapat dilakukan secara bertingkat.
2. Bahan bakar yang digunakan biodiesel minyak jelantah B-100.
3. Tidak membahas proses pembuatan ECU.
4. Tidak membahas reaksi kimia biodiesel yang terjadi.
5. Kondisi udara dianggap ideal.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana merancang mekanisme sistem injeksi bertingkat pada mesin diesel stasioner *Diamond* tipe Di 800.

2. Bagaimana pengaruh kondisi sistem injeksi bertingkat terhadap unjuk kerja, kondisi suhu/operasional mesin dan emisi gas buang.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem injeksi 2-tingkat memiliki karakteristik semprotan bahan bakar yang lebih baik daripada sistem injeksi single sehingga menghasilkan pembakaran yang baik.
2. Dengan sistem ECU bahan bakar juga menjadi lebih efisien.
3. Dengan BBM biodiesel minyak jelantah diharapkan dapat mengurangi emisi gas buang.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. **BAB I PENDAHULUAN**
Pada bagian ini diuraikan , permasalahan, tujuan, batasan masalah dan manfaat penelitian.
2. **BAB II KAJIAN PUSTAKA**
Pada bagian ini diuraikan beberapa landasan teori tentang mesin diesel, seperti proses pembakaran pada mesin diesel, bahan bakar mesin diesel, bahan bakar biofuel dan parameter unjuk kerja mesin.
3. **BAB III METODE PENELITIAN**
Pada bagian ini diuraikan tentang spesifikasi bahan bakar yang digunakan dan pengujian unjuk kerja mesin diesel (seperti peralatan pengujian, skematik diagram peralatan pengujian, prosedur pengujian dan variasi pengambilan data pengujian).

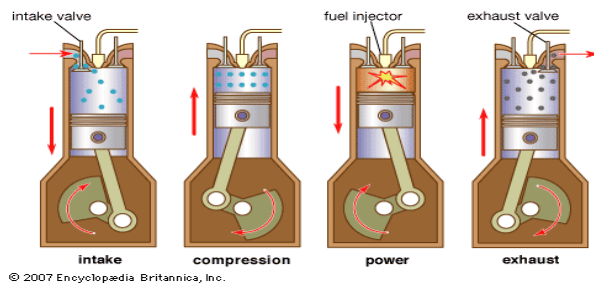
4. **BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISA**
Dalam bab ini dibahas tentang perhitungan dan analisa dari data yang didapat dari hasil penelitian.
5. **BAB V PENUTUP**
Pada bagian ini berisi kesimpulan hasil penelitian serta saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar Teori Mesin Diesel

Mesin diesel bekerja dengan menghisap udara dari luar, kemudian dikompresikan sehingga mencapai tekanan dan temperatur yang tinggi. Sesaat sebelum mencapai TMA, bahan bakar diinjeksikan dengan tekanan yang sangat tinggi dalam bentuk butiran-butiran halus dan lembut. Kemudian butiran-butiran lembut/pengkabutan bahan bakar tersebut bercampur dengan udara bertemperatur tinggi dalam ruang bakar dan menghasilkan pembakaran.

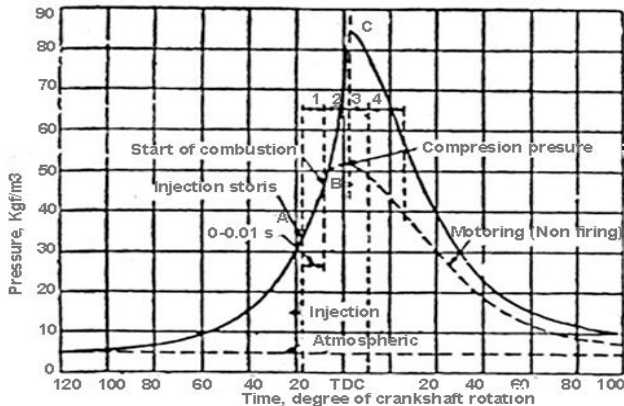


Gambar 2.1 Proses 4 Langkah Mesin Diesel [7]

2.1.1. Tahapan Pembakaran Pada Mesin Diesel

Agar terjadinya tahap pembakaran di ruang bakar pada mesin diesel harus ada beberapa syarat yang harus dipenuhi, antara lain : adanya campuran yang dapat terbakar, adanya sesuatu yang menyulut terjadinya pembakaran dan adanya kompresi yang sesuai dari api dalam ruang bakar.

Pada proses pembakaran pada mesin diesel memiliki tahapan tingkat pembakaran di motor CI (*Combustion Ignition*) digambarkan dalam diagram P- θ .



Gambar 2.2. Tahapan Pembakaran Pada Mesin Diesel [8]

a) Tahap pertama / Tingkat Pertama

Tahap ini disebut juga *Ignition Delay Period* yaitu area dalam rentang A-B pada Gambar 2.1. Tahapan ini merupakan periode atau rentang waktu yang dibutuhkan bahan bakar ketika saat pertama kali bahan bakar diinjeksikan (titik A) hingga saat pertamakali muncul nyala pembakaran (titik B). Artinya, selama periode tersebut tidak terjadi proses pembakaran. Panjangnya periode ini biasanya dipengaruhi oleh properties yang dimiliki bahan bakar yaitu temperatur terbakar sendiri bahan bakar, tekanan injeksi atau ukuran droplet, sudut awal injeksi, rasio kompresi, temperatur udara masuk, temperatur cairan pendingin, temperature bahan bakar, tekanan udara masuk (*supercharge*), kecepatan/putaran mesin diesel, rasio udara-bahan bakar, ukuran mesin, jenis ruang bakar.

b) Tahap Kedua / Tingkat Kedua

Pada tahap ini terjadi apa yang disebut *Rapid or Uncontrolled Combustion* yang maksudnya adalah periode awal pembakaran hingga *flame* mulai berkembang yang diindikasikan oleh area B-C pada Gambar 2.1. Bahan bakar

berupa droplet-droplet di selubungi oleh udara bertemperatur tinggi, sehingga panas yang diterima akan menguapkan droplet-droplet bahan bakar tersebut. Bagian terluar droplet-droplet tersebut yang lebih dulu menerima panas dan menguap kemudian terbakar. Panas yang ditimbulkan oleh pembakaran tersebut naik sangat drastis dan memicu proses yang sama pada bagian lain yang belum terbakar dengan cepat dan tidak beraturan. Proses ini menyebabkan kenaikan tekanan yang sangat besar.

c) Tahap Ketiga / Tingkat Ketiga

Pada tahap ini terjadi apa yang disebut *Controlled Combustion* seperti diindikasikan oleh area C-D pada Gambar 2.1 dimana bahan bakar segera terbakar setelah diinjeksikan. Hal ini disebabkan nyala pembakaran yang terjadi pada periode sebelumnya bergerak bersama menuju droplet-droplet yang baru diinjeksikan. Pembakaran dapat dikontrol dengan sejumlah bahan bakar yang diinjeksikan pada periode ini. Periode ini berakhir setelah injektor berhenti menginjeksikan bahan bakar ke ruang bakar.

d) Tahap Keempat / Tingkat Keempat

Meskipun pada tahap ketiga telah selesai proses injeksi bahan bakar, kenyataannya masih ada bahan bakar yang belum terbakar seluruhnya. Dalam hal ini nyala pembakaran terus berkembang membakar bahan bakar yang tersisa pada ruang bakar. Periode ini disebut juga *afterburning* yang diindikasikan oleh area setelah titik D pada Gambar 2.1. Apabila kenyataannya masih ada bahan bakar yang belum terbakar sementara piston telah bergerak dari Titik Mati Bawah (TMB) ke Titik Mati Atas (TMA) untuk melakukan langkah buang, maka sisa-sisa bahan bakar tersebut akan ikut keluar bersama gas buang sebagai *unburnt fuel*.

2.2 Bahan Bakar Alternatif Diesel

Bahan bakar alternatif hasil dari olahan minyak bumi untuk motor diesel dapat di peroleh dengan membuatnya. Bahan bakar pengganti untuk keperluan tersebut dibuat dengan proses dari minyak yang dihasilkan dari daun tumbuhan, biji tumbuhan, umbi tumbuhan atau bahan bakar pada seperti batu bara, arang kayu. Produk buangan sampah dari palstik, karet, yang berasalkan dari minyak bumipun dapat diputar kembali menjadi bahan bakar cair untuk keperluan pembakaran. Dikarenakan dibuat dari tumbuhan yang hidup, maka bahan bakar tersebut mempunyai nama khusus yakni bio-fuel atau khusus bio-diesel.

Biodiesel adalah bahan bakar cair yang didapatkan dari lemak mahluk hidup atau tumbuh-tumbuhan. Komposisi biodiesel umumnya terdiri dari berbagai jenis asam lemak yang melalui proses kimiawi ditransformasi menjadi "Metil Ester Asam Lemak" (*Fatty Acid Methil Esters* = FAME). Pemilihan terhadap tumbuhan penghasil biodiesel amat tergantung dari keadaan lingkungan setempat. Untuk Indonesia biodiesel yang paling menarik adalah dari kelapa sawit.

Cara memproduksi biodiesel dapat dilakukan melalui proses transesterifikasi minyak nabati dengan metanol atau esterifikasi langsung asam lemak hasil hidrolisis dengan metanol. Namun, transesterifikasi lebih intensif dikembangkan karena proses ini lebih efisien dan ekonomis.

Selain dapat digunakan langsung, biodiesel juga dapat dicampur dengan solar atau minyak diesel lainnya dengan tujuan untuk mengubah karakteristiknya agar sesuai dengan kebutuhan. Sebagai contoh, B-100 merupakan biodiesel murni sedangkan B-10, B-30, B-50 merupakan campuran dari 10 % biodiesel 90 % minyak diesel (solar), 30 % biodiesel 70 % minyak diesel (solar) dan 50 % biodiesel 50 % minyak diesel (solar).

2.2.1 Karakteristik Biodiesel

Biodiesel tidak mengandung *nitrogen* atau senyawa aromatik dan hanya mengandung sulfur kurang dari 15 ppm (part per million). Biodiesel mengandung kira-kira 11 % oksigen dalam persen berat yang keberadaannya mengakibatkan berkurangnya kandungan energi (LHV menjadi lebih rendah bila dibandingkan dengan solar) namun menurunkan kadar emisi gas buang yang berupa *karbon monoksida* (CO), *hidrokarbon* (HC), *partikulat* dan jelaga. Kandungan energi biodiesel kira-kira 10 % lebih rendah bila dibandingkan dengan solar. Efisiensi bahan bakar dari biodiesel kurang lebih sama dengan solar, yang berarti daya dan torsi yang dihasilkan proporsional dengan kandungan nilai kalor pembakarannya (LHV).

Kandungan asam lemak dalam minyak nabati yang merupakan bahan baku biodiesel menyebabkan biodiesel sedikit kurang stabil bila dibandingkan solar khususnya dalam hal terjadinya oksidasi. Kestabilan suatu biodiesel dapat diprediksi dengan mengetahui jenis bahan bakunya.

Kestabilan yang rendah dari suatu jenis biodiesel dapat meningkatkan kandungan asam lemak bebas, menaikkan *viskositas* dan terbentuknya *gums* dan sedimen yang dapat menyumbat saringan bahan bakar. Oleh karena itu, biodiesel dan bahan bakar yang mengandung campuran sebaiknya tidak disimpan lebih dari 6 bulan karena lamanya penyimpanan mempengaruhi terjadinya oksidasi. Salah satu cara yang dapat diupayakan bila biodiesel harus disimpan lebih dari 6 bulan adalah dengan menambahkan anti oksidan. Jenis anti oksidan yang dapat bekerja dengan baik pada biodiesel antara lain TBHQ (*t-butyl hydroquinone*), Tenox 21 dan Tocopherol (Vitamin E).

Biodiesel mempunyai sifat melarutkan (*Solvency*) hal ini dapat menimbulkan permasalahan, dimana bila digunakan pada mesin diesel yang sebelumnya telah lama menggunakan solar dan didalam tangki bahan bakarnya telah terbentuk

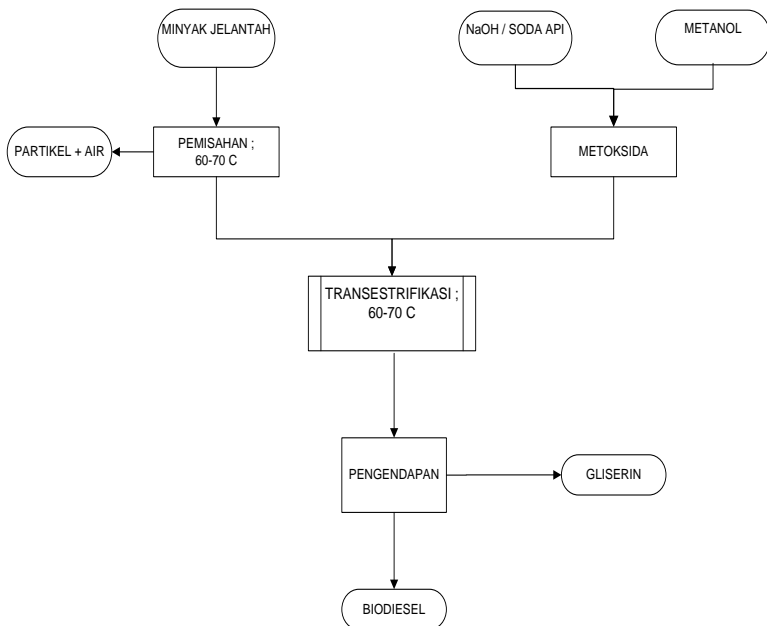
sedimen dan kerak, maka biodiesel akan melarutkan sedimen dan kerak tersebut sehingga dapat menyumbat saluran dan saringan bahan bakar. Oleh karena itu, bila kandungan sedimen dan kerak pada tangki bahan bakar cukup tinggi, Sebaiknya diganti sebelum menggunakan biodiesel. Hal lain yang dapat dilakukan adalah dengan tidak menggunakan biodiesel murni melainkan campurannya. Sifat pelarut dari bahan bakar yang mengandung campuran biodiesel akan semakin berkurang seiring dengan berkurangnya kadar biodiesel didalamnya. Penelitian menunjukkan bahwa campuran antara biodiesel dan solar dengan komposisi 10 % : 90 % (B-10), 30 % : 70 % (B-30), 50 % : 50 % (B-50) mempunyai sifat pelarut yang cukup kecil sehingga dapat ditoleransi.

Beberapa material seperti kuningan, tembaga, timah dan seng dapat mengoksidasi biodiesel dan menghasilkan sedimen. Untuk mencegah hal ini maka sebaiknya biodiesel terbuat dari bahan *stainless steel* atau almunium, karena biodiesel bereaksi beberapa sejumlah material logam. Biodiesel murni mempunyai sifat pelumas yang baik, bahkan campuran bahan bakar yang mengandung biodiesel dalam komposisi yang rendah masih memiliki sifat pelumas yang jauh lebih baik dibanding solar.

Biodiesel memiliki temperatur titik tuang (pour point) yang lebih tinggi yaitu sekitar -15°C sampai 10°C dibandingkan solar yang memiliki -35°C sampai -15°C , sehingga pemakaian biodiesel murni pada daerah rendah kurang dianjurkan. Untuk menurunkan temperatur titik tuang biodiesel dapat dilakukan dengan mencampurkan solar, semakin besar komposisi solar dalam campuran, maka semakin rendah temperatur titik tuangnya. Cara lain adalah dengan menambahkan zat aditif, tetapi penelitian menunjukkan bahwa pemakaian zat aditif seperti "pour point depresant" tidak cukup efektif ketika digunakan pada B-100.

2.2.2 Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Jelantah

Biodiesel dibuat melalui suatu proses kimia yang disebut *transesterifikasi* dimana gliserin dipisahkan dari minyak nabati. Proses ini menghasilkan dua produk yaitu *metil esters* (biodiesel) / *mono-alkyl esters* dan gliserin yang merupakan produk samping. Bahan baku utama untuk pembuatan biodiesel antara lain minyak nabati, lemak hewani, lemak bekas/lemak daur ulang. Semua bahan baku ini mengandung *trigliserida*, asam lemak bebas dan zat pencemar dimana tergantung pada pengolahan pendahuluan dari bahan baku tersebut. Tetapi yang paling sering diproduksi adalah metil ester karena metanol mudah didapat dan tidak mahal.



Gambar 2.3. Diagram Alir Pembuatan Biodiesel

- Transesterifikasi

Transesterifikasi (disebut juga alkoholisis) adalah reaksi antara lemak atau minyak nabati dengan alkohol untuk membentuk ester dengan alkohol untuk membentuk ester dan gliserol.

Ada beberapa pilihan katalis reaksi yang dapat digunakan dalam proses transesterifikasi ini antara lain berupa alkali yang biasa digunakan antara lain NaOH, KOH, karbonat, natrium metoksida, sodium butoksida. Katalis asam yang biasa digunakan antara lain asam sulfat, asam sulfonat dan asam hidroklorida. Sedangkan sebagai katalis enzim dalam proses transesterifikasi biasa digunakan lipase.

Hasil reaksi yang terbentuk berupa dua fasa yaitu lapisan atas *metil ester* berwarna kuning bening, sedangkan lapisan bawah berwarna kuning dengan sedikit lebih pekat. Setelah reaksi selesai, dilakukan pemisahan secara sederhana, lapisan atas berupa metil ester dipisahkan dengan cara dituang dan triasetilgliserol dibiarkan mengendap didasar reaktor. Setelah dipisahkan dari triasetilgliserol, metil ester yang berbentuk langsung dicuci dengan air hangat secara perlahan-lahan menggunakan aquades. Tujuan pencucian ini adalah untuk menghilangkan sisa metil asetat dan sisa katalis KOH yang masih terdapat dalam produk. Air merupakan pelarut polar sehingga akan dapat melarutkan senyawa polar seperti metil asetat dan sisa katalis KOH.

Setelah dilakukan pencucian dengan air hangat, proses *treatment* berikutnya adalah penghilang kandungan air dari produk metil ester yang terbentuk. Proses penghilang kandungan air ini dimaksudkan untuk mencegah terjadi reaksi penyabunan berkelanjutan. Reaksi penyabunan mungkin terjadi jika masih ada sisa metil asetat dan

katalis KoH yang tidak larut selama proses pencucian. Proses penghilang kandungan air dilakukan dengan merendam produk metil ester yang terbentuk dalam *waterbath* pada suhu 100°C selama 2 menit. Dalam proses pengeringan terlihat adanya uap air yang terbentuk dan menempel pada dinding labu *erlenmeyer* yang berisikan metil ester, maka setiap sampel dianalisa.

2.2.3 Karakteristik Minyak Jelantah

Minyak jelantah (*fried palm oil*) merupakan limbah dan bila ditinjau dari komposisi kimianya, minyak jelantah mengandung senyawa-senyawa yang bersifat karsinogenik, yang terjadi selama proses penggorengan. Jadi jelas bahwa pemakaian minyak jelantahyang berkelanjutan dapat merusak kesehatan manusia, menimbulkan penyakit kanker, dan akibat selanjutnya dapat mengurangi kecerdasan generasi berikutnya. Untuk itu perlu penanganan yang tepat agar limbah minyak jelantah ini dapat bermanfaat dan tidak menimbulkan kerugian dari aspek kesehatan manusia dan lingkungan.

Salah satu bentuk pemanfaatan minyak jelantah agar dapat bermanfaat dari berbagai macam aspek ialah dengan mengubahnya secara proses kimia menjadi biodiesel. Hal ini dapat dilakukan karena minyak jelantah juga merupakan minyak nabati, turunan dari CPO (*crude pal m oil*). Adapun pembuatan biodiesel dari minyak jelantah ini menggunakan reaksi *transesterifikasi* seperti pembuatan biodiesel pada umumnya dengan *pretreatment* pada minyak jelantah.

Biodiesel dari subtrat minyak jelantah merupakan alternatif bahan bakar yang ramah lingkungan sebagaimana biodiesel dari minyak nabati

lainnya. Hasil uji gas buang menunjukkan keunggulan FMAE dibandingkan solar, terutama penurunan partikulat/debu sebanyak 65%. Biodiesel dari minyak jelantah ini juga memenuhi persyaratan SNI untuk biodiesel. Dari semua pernyataan yang muncul maka yang menjadi permasalahan utama ialah pengumpulan minyak jelantah yang tidak mudah, selain karena persebarannya cukup luas dan tidak merata, tapi juga tidak sedikitnya pengumpul minyak jelantah dari restoran-restoran yang nantinya akan mereka olah kembali, bisa juga tidak, untuk kemudian dijual ke pedagang kecil maupun untuk keperluan lain. Disatu sisi berdasarkan pengamatan penulis, para pedagang kecil yang menggunakan minyak goreng untuk dagangannya akan membuang minyak jelantah sisa menggoreng ke seleokan yang terdekat yang bermuara pada sungai, sehingga dapat menjadi salah satu sumber polusi pada perairan sungai.

Oleh karena itu pemanfaatan minyak jelantah sebagai bahan bakar motor diesel merupakan suatu cara pembuangan limbah (minyak jelantah) yang menghasilkan nilai ekonomis serta menciptakan bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar solar yang bersifat etis, ekonomis dan sekaligus ekologis.

Tabel 2.1 Propertis Bahan Bakar Solar [9]

No.	Properties	Unit	Limit	
			Min	Max
1.	Density pada 15 °C	kg/m ³	815	870
2.	Angka Cetane	-	45	-
3.	Index Cetane	-	48	-
4.	Visc. Kinematik pada 40 °C	mm ² /sec	2.0	5.0
5.	Titik Didih	°C	-	18
6.	Titik Nyala	°C	60	-
7.	Distilasi: T95	°C	-	370
8.	Kandungan Belerang	% massa	-	0.35
9.	Korosi Copper	Merit	-	No. 1
10.	Residue Konradson Carbon	Merit	-	No. 1
11.	Kandungan Abu	% m/m	-	0.01
12.	Kandungan Air	Mg/kg	-	500
13.	Partikulat	Mg/l	-	0.01
14.	Angka Asam Kuat	mgKOH/g	-	-
15.	Total Asam Kuat	mgKOH/g	-	0.6
17.	Warna	No. ASTM	-	3.0
18.	API Gravity pada 15 °C	-	-	-

Tabel 2.2 Indonesian Biodiesel Standard SNI 04-7182-2012

No	Properties dan Unit	Nilai Limit	Pengujian
1.	Density pada 40 °C, kg/m ³	850-890	ASTM D 1298
2.	Angka Cetane	Min. 51	ASTM D 613
3.	Visc. Kinematik pada 40 °C, mm ² /sec	2,3-6,0	ASTM D 445
5.	Titik Keruh, °C	Max. 18	ASTM D 2500
6.	Titik Nyala, °C	Min. 100	ASTM D 93
7.	Distilasi pada temperature 90 %, °C	Max. 360	ASTM D 1160
8.	Korosi Copper, 3 jam 50 °C	Max. no. 3	ASTM D 130
9.	Residue Konradson Carbon, %-b (Desitilasi 10 %)	Max. 0,3	ASTM D 4530
10.	Residue Konradson Carbon, %-b (Sampelasli)	Max. 0,05	ASTM D 4530
11.	Kandungan Abu, %-b	Max. 0,02	ASTM D 874
12.	Kandungan Air dan Sedimen, %-vol	Max. 0,05	ASTM D 2079
13.	Fosfor, mg/kg	Max. 10	AOCS Ca 12-55
14.	Angka asam, mg-KOH/g	Max. 0,6	ASTM D 664
15.	Gliserol bebas, %-massa	Max. 0,02	ASTM D 6584
16.	Gliserol total, %-massa	Max. 0,24	ASTM D 6584
17.	Belerang, mg/kg	Max. 100	ASTM D 5453
18.	Angka Iodium, %-massa	Max. 115	AOCS Cd-125

Tabel 2.3 Macam-Macam Propertis Biodiesel

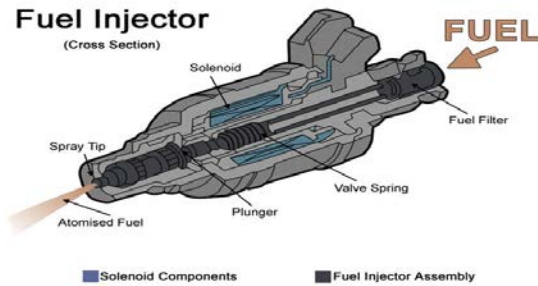
Jenis minyak/ Type of oil	Suhu/Titik Pembakaran/ Ignition point (°C)	Viskositas kinematis/ Kinematic viscosity (10 ⁻⁶ m ² /det)	Bilangan iod/ Iodin number	Bilangan penyabunan/ Saponification number	Nilai kalor total/ Gross calorific value (MJ/kg)
a. Minyak nabati/ Vegetable oil					
- Minyak jarak pagar/ Jatropha curcas oil	340	75,7	103,0	198,0	39,65
- Minyak kelapa/ Coconut oil	270-300	51,9	10,4	198,0	37,54
- Minyak sawit/ Palm oil	314	88,6	54,2	199,1	39,54
- Minyak kanola/ Canola oil	317	97,7	98,6	174,7	40,56
b. Minyak bumi/ Fossil fuel					
- Minyak tanah/ Kerosene	50-55	2,2	-	-	43,50
- Minyak solar/ Diesel fuel	55	2-8	-	-	45,00

Sumber: Muhlbauer et al.⁸

2.3 Definisi Dan Fungsi Injektor

Fungsi utama dari injektor adalah untuk mengkabutkan bahan bakar baik bermekanisme maupun elektronik. Sehingga adanya injektor maka bahan bakar yang dikabutkan membuat proses pembakaran menjadi sempurna karena mengubah fase dari *liquid* hingga menjadi kabut atau mendekati fase gas. Dengan injektor membentuk suatu sistem seal dimana terjadi buka tutup aliran bahan bakar dari *high pressure pump* ke ruang bakar.

Injektor merupakan alat yang dipasang baik pada *intake manifold* pada *non direct injection* ataupun langsung pada ruang bakar pada sistem *direct injection* yang fungsinya seperti kontrol suplai bahan bakar. Injektor terdiri dari bagian yang berbeda beda, antara lain adalah filter, *solenoid*, *valve spring*, soket elektrik, *plunger*, *spray tip*.

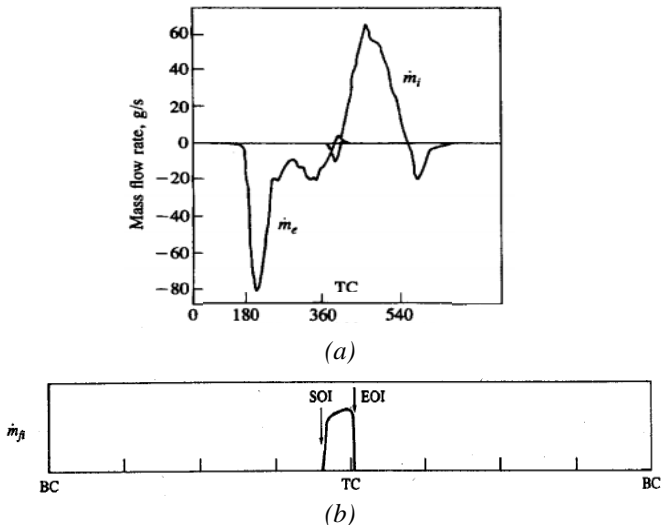


Gambar 2.4 Struktur injektor elektrik dan bagian dari injektor bersolenoid [10]

Nosel/injektor, tergolong NC (*Normally Closed*), dan membuka ketika akan menyemprotkan bahan bakar yang bertekanan (< 200 bar) selama ada arus listrik yang menyuplai koil selenoidnya. Durasi tutup-buka-tutup, dinamakan lebar pulsa (*pulse width*), sebanding dengan bahan bakar yg diinginkan. Pulsa elektrik diselaraskan pada sekuen buka tutup katub pada setiap masing-masing individu piston atau grup piston. Proses kontrol buka tutup injektor di kontrol oleh ECU. Ketika ECU memerintahkan injektor membuka maka ECU mengirim sinyal berupa voltase. Voltase yang dikirim akan mengaktifkan mekanisme solenoid yang berupa rangkaian elektronik *coil winding*. *Coil winding* nanti akan menghasilkan medan magnet yang akan mendorong pintle menjauh dari pintle seat sehingga bahan bakar dapat mengalir keluar dari injektor. Pada injektor juga terdapat pintle cap yang bertujuan untuk melindungi injektor dari panas yang ditimbulkan mesin.

2.3.1 Profil Udara Masuk Dan Laju Aliran Bahan Bakar Menurut Heywood

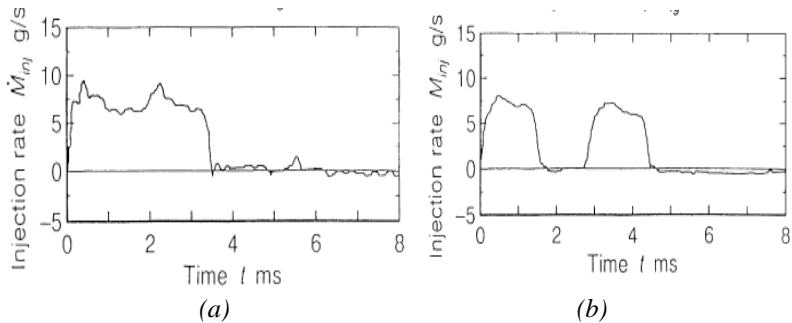
Pada gambar (a) yang menunjukkan profil *massflowrate* udara masuk ke ruang bakar (\dot{m}_i) pada langkah hisap dan udara *exhaust* pada langkah buang (\dot{m}_e). Grafik ini dihasilkan pada pengoperasian mesin empat langkah penyalan busi pijar, pada putaran konstan rpm sehingga throttle terbuka total. Pada grafik dapat dilihat bahwa daya hisap maksimal / induksi maksimal terjadi pada nilai tengah antara $360^\circ - 540^\circ$ CA, kemudian terjadi penurunan sampai nilai nol (0) pada beberapa derajat sebelum 540° CA atau mendekati akhir langkah hisap. Pada gambar (b) dapat diketahui bawah pada *start of injection* (SOI) laju aliran massa bahan bakar mulai diinjeksikan pada tekanan tertentu dan kemudaaian massa aliran bahan bakar mulai menurun pada saat *end of injection* (EOI).



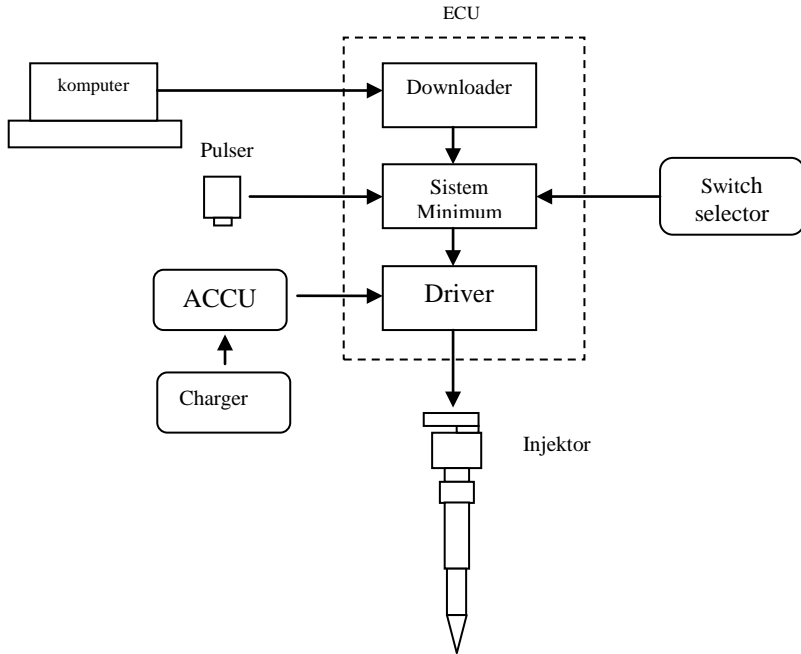
Gambar 2.5 (a) Grafik Mass Flow Rate Udara Masuk dan Exhaust Terhadap Crank angle. (b) Fuel Mass Flow Rate.[13]

2.4 Karakteristik ECU Dan Karakteristik Injeksi Satu Tingkat Maupun Dua Tingkat

Pada proses injeksi satu tingkat (a) menurut Kenji A. dan Yukihiro Hashimoto [17] fenomena penelitian yang dilakukan pada pengaturan waktu 3 – 4 ms sesudah *start of injection* menghasilkan kondisi *injection rate* 8-10 g/s . Dikarenakan udara pada temperatur lingkungan sekitar relatif lebih rendah 550⁰C sehingga perbandingan bahan bakar dan udara yang masuk didalam ruang bakar tidak sesuai. Pada injeksi dua tingkat (b) pada semprotan yang kedua menghasilkan kondisi *injection rate* 8-10 g/s dengan kondisi yang sama pada injeksi yang pertama. Kemudian injeksi yang kedua mempunyai durai waktu jeda (*dwelltime*) 1,3 ms dan pada *ignition delay* 4,5 ms karakteristik injeksi dua tingkat bekerja.



Gambar 2.6 (a) Karakteristik Injeksi Satu tingkat (b) Karakteristik Injeksi DuaTingkat [17]



Gambar 2.7 Skema ECU

Pada penelitian ini peranan ECU sangat dibutuhkan dalam mengatur sistem kerja solenoid injektor. Dimana sistem kerja ECU adalah mengatur timing bukaan injektor dan mengatur prosentase timing waktu injeksi bertingkat berdasarkan inputan berupa sensor posisi poros engkol yaitu pulser dan switch selector sebagai tombol pemilih variasi injeksi dan accu sebagai sumber tegangan listrik. Sistem pada ECU dibagi dalam 3 bagian yaitu downloader, sistem minimum dan driver. Downloader bertugas menghubungkan ECU dengan komputer sehingga dapat di inputkan program

dari komputer ke ECU. Sistem minimum adalah pusat kerja dari ECU yakni memproses logika data yang telah di inputkan dengan mengacu pada inputan lain berupa pulser dan switch selector yang kemudian memberikan output berupa sinyal pada driver. Pada driver sinyal inputan dari sistem minimum dinaikkan tegangannya karena spesifikasi kerja injektor yang membutuhkan tegangan listrik yang besar.

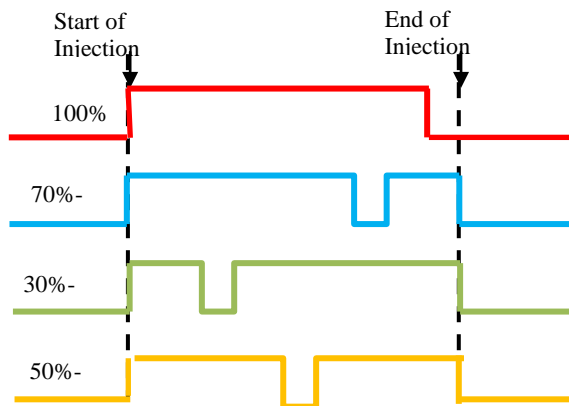
2.4.1 Penerapan Teknologi Injeksi Bertingkat Pada Injektor Solenoid

Penggunaan teknologi injeksi bertingkat sebenarnya sudah dilakukan lebih dahulu pada mesin bensin dengan sistem injeksi EFI (*Elektronik Fuel Injection*) sejak tahun 1980an. Pada diesel injeksi bertingkat diaplikasikan pada sistem diesel *Commonrail*. Prinsip EFI dan *Commonrail* sangat mirip yakni suplai bahan bakar diatur secara elektronik. Yang membedakan adalah pada tekanan pompa bahan bakarnya yang pada EFI bensin tekanan bensin hanya 3,5-5 bar sedangkan pada *commonrail* solar bisa ditekan hingga < 200 bar. Pada teknologi injeksi bertingkat mutlak diperlukan injektor bersolenoid agar bisa melakukan proses injeksi hingga 2 kali dalam 1 siklus.

Dari penelitian sebelumnya yang sudah dilakukan pada dengan mesin diesel diamond yang dilakukan oleh Bambang S. dkk [5] dengan injeksi satu tingkat yaitu settingan durasi bukaan injektor selama 10ms dilakukan settingan pada ECU untuk sistem injeksi bertingkat 75%-25%, 50%-50%, dan 25%-75%. Pada settingan 75%-25% pada injeksi yang pertama injektor diatur agar membuka selama 7,5 ms kemudian injeksi yang kedua selama 2,5 ms sedangkan jeda (*dwell time*) yang digunakan adalah selama 1ms. Pada Settingan 50%-50% dan 25%-75% juga dilakukan hal yang sama dengan memberikan jeda (*dwell time*) selama 1ms. Skema durasi injeksi bertingkat 75%-25%, 50%-50%, dan 25%-75%.

2.4.2 Metoda Injeksi Bertingkat Dibandingkan Dari Penelitian Sebelumnya

Berdasarkan atas beberapa penelitian terdahulu serta dasar pustaka, dapat disimpulkan bahwa pada karakteristik semprotan dengan variasi 75%-25%, 50%-50%, dan 25%-75% mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap penurunan emisi gas buang. Oleh karena itu pada penelitian yang akan dilakukan, dengan variasi karakteristik semprotan 70%-30%, 50%-50% dan 30%-70%. Pada settingan 70%-30% pada injeksi yang pertama injektor diatur agar membuka selama 7 ms kemudian injeksi yang kedua selama 3 ms sedangkan jeda (dwell time) yang digunakan adalah selama 1ms. Pada Settingan 50%-50% dan 30%-70% juga dilakukan hal yang sama dengan memberikan jeda (dwell time) selama 1ms. Diharapkan pada perubahan karakteristik semprotan yang dirubah pada variasi 70%-30%, 50%-50% dan 30%-70% dapat mengurangi emisi gas buang yang berlebih dan mampu mengurangi konsumsi bahan bakar sehingga temperatur kondisi mesin diesel diamond type di 800 dapat menurun.



Gambar 2.8 Variasi Profil Injeksi Bertingkat Pada Mesin Diesel

2.4.3 Keunggulan Sistem Injeksi Bertingkat

Beberapa kelebihan dari injeksi bertingkat adalah sebagai berikut:

1. Memperbaiki kualitas pembakaran
Pada injeksi multi tingkat injeksi pilot dimaksudkan agar memberi waktu untuk tercampurnya antara bahan bakar dan udara sehingga kualitas pembakaran menjadi lebih baik.
2. Mengurangi getaran dan kebisingan
Pada langkah Pre-injeksi membuat pendek ignition delay pada *main injection* sehingga mengurangi terbentuknya NOx, getaran dan kebisingan.
3. Mengurangi polusi gas buang
Polusi gas buang yang timbul akibat suplai bahan bakar yang tidak akurat bisa diminimalisir.

2.4.4 Kekurangan Sistem Injeksi Bertingkat

Dalam aplikasi penggunaan *electronic fuel injection*, terdapat beberapa pertimbangan yang menyebabkan teknologi tersebut kurang dipilih sebagai sistem suplai bahan bakar pada mesin diesel. Beberapa kekurangan yang dapat menjadi penyebabnya adalah:

1. Faktor desain dan produksi
Menerapkan injeksi bertingkat berarti mengaplikasi sistem EFI pada mesin diesel yang menyebabkan sistem distribusi solar menjadi semakin rumit dan biaya produksi untuk parts yang mendukung sistem EFI semakin mahal membuat harganya menjadi melonjak.
2. Faktor Tekanan
Pada saat penyemprotan kedua rentan terhadap kehilangan tekanan sehingga pada waktu bahan bakar disemprotkan tidak bisa menghasilkan pengkabutan yang sempurna.

3. Faktor *Valued for Money*

Pada mesin diesel putaran rendah dan kapasitas kecil, efisiensi yang dihasilkan oleh EFI kurang sebanding dengan biaya yang diperlukan untuk mengaplikasikannya. Injeksi konvensional masih cukup memadai dalam mensuplai bahan bakar pada mesin diesel tersebut.

2.5. Unjuk Kerja Mesin Diesel

2.5.1 Daya Efektif (Ne)

Daya mesin merupakan daya yang diberikan untuk mengatasi beban yang diberikan. Daya yang dihasilkan pada mesin diesel yang dikopel dengan generator listrik dapat dihitung berdasarkan beban pada generator listrik dan dinyatakan sebagai Daya Efektif pada Generator (Ne). Hubungan tersebut dinyatakan dengan rumus :

$$Ne = \frac{V \times I \times \cos\phi}{\eta_{generator} \times \eta_{transmisi}} \text{ (watt)} \quad (2.1)$$

Dimana:

- Ne = Daya efektif (watt)
- V = Tegangan listrik (Volt)
- I = Arus listrik (Ampere)
- η_{gen} = Efisiensi mekanisme generator (0,9)
- η_{trnsn} = Efisiensi transmisi (0,95)
- $\cos \theta$ = Faktor daya listrik ($\cos \phi$) = 1

(*Sumber Heywood, J. B., (1976)*)

2.5.2 Torsi (Mt)

Torsi merupakan ukuran kemampuan mesin untuk menghasilkan kerja. Dalam prakteknya, torsi dari mesin berguna untuk mengatasi hambatan sewaktu berkendara. Momen torsi dihitung dengan persamaan seperti berikut:

$$M_t = \frac{N_e (\text{watt})}{n (\text{rev/min})} \times \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ W} \cdot \text{s}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ rev}}{2\pi} \times \frac{1 \text{ Nm}}{1 \text{ J}} (\text{Nm})$$

$$M_t = \frac{N_e}{n} (N \cdot m) \quad (2.2)$$

Dimana:

M_t	= Torsi (N•m).
N_e	= Daya (watt).
n	= Putaran mesin (rev / min)

Dari persamaan tersebut, torsi sebanding dengan daya yang diberikan dan berbanding terbalik dengan putaran mesin. Semakin besar daya yang diberikan mesin, maka torsi yang dihasilkan akan mempunyai kecenderungan untuk semakin besar. Semakin besar putaran mesin, maka torsi yang dihasilkan akan semakin kecil.

2.5.3 Tekanan Efektif Rata-rata (bmep)

Proses pembakaran campuran udara-bahan bakar menghasilkan tekanan yang bekerja pada piston sehingga melakukan langkah kerja. Besarnya tekanan ini berubah-ubah sepanjang langkah piston tersebut. Bila diambil tekanan yang berharga konstan yang bekerja pada piston dan menghasilkan kerja yang sama, maka tekanan tersebut dikatakan sebagai kerja per siklus per volume langkah Piston. Tekanan efektif rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang volume langkah piston sehingga menghasilkan daya yang besarnya sama dengan daya efektif.

Perumusan bmep adalah:

$$BMEP = \frac{N_e (W) \cdot z}{V (dm^3) \cdot n (\text{rev/min}) \cdot i} (kpa)$$

$$bmep(kpa) = \frac{W}{dm^3 \cdot rev/min} \times \frac{1 rev}{2\pi} \times \frac{60s}{1min} \times \frac{1J}{1W \cdot s} \times \frac{1Nm}{1J}$$

$$bmep = \frac{N}{dm^3} \quad (2.3)$$

Dimana:

Ne = Daya poros mesin (W).

V = Volume silinder (dm^3).

i = Jumlah silinder.

n = Putaran mesin diesel (rev/min).

Z = jumlah putaran dalam satu siklus langkah kerja, 1 (mesin 2 langkah) atau 2 (mesin 4 langkah).

2.5.4 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (Sfc)

Merupakan ukuran pemakaian bahan bakar oleh suatu engine, yang diukur dalam satuan massa bahan bakar per satuan keluaran daya atau juga dapat didefinisikan sebagai laju aliran bahan bakar yang dipakai oleh motor untuk menghasilkan tenaga. Besarnya *Specific Fuel Consumption* dapat dihitung dengan persamaan.

$$\dot{m}_{bb} = \frac{3600 \times m_{bb}}{(s)} = \frac{kg}{watt \cdot jam}$$

Sedangkan besarnya pemakaian bahan bakar spesifik adalah:

$$sfc = \frac{3600 \times \dot{m}_{bb}}{Ne} = \frac{kg}{watt \cdot jam} \quad (2.4)$$

Dimana:

Ne = Daya efektif (watt.jam)

\dot{m}_{bb} = Massa bahan bakar (kg)

s = Waktu konsumsi bahan bakar (detik)

2.5.5 Efisiensi Thermis (η_{th})

Efisiensi termal adalah ukuran besarnya pemanfaatan energy panas yang tersimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh mesin pembakaran dalam. Secara teoritis dituliskan dalam persamaan:

$$\eta_{th} = \frac{\text{Daya Efektif Yang Dihasilkan}}{\text{Mass flow rate bahan bakar} \times \text{Nilai kalor bawah bahan bakar}} \times 100\%$$

$$\eta_{th} = \left(\frac{Ne}{\dot{m}_{bb} \times NKB} \right) \times 100 \% \quad (2.5)$$

Dimana:

\dot{m}_{bb} = Massa bahan bakar (kg)

NKB = Nilai kalor bawah bahan bakar (btu/lb) dapat dicari dari pengujian *bomb calorimeter*

2.6 Emisi Gas Buang

Gas buang merupakan semua partikel baik berupa padatan, cairan dan gas yang dikeluarkan dari ujung knalpot ke udara atmosfer. Gas buang menjadi permasalahan yang amat serius bagi lingkungan hidup, oleh karena itu dianggap perlu menjadi tolak ukur unjuk kerja mesin.

2.6.1 Emisi NO_x

NO_x terbentuk atas tiga fungsi yaitu Suhu (T), Waktu Reaksi (t), dan konsentrasi Oksigen (O₂), $No_x = f(T, t, O_2)$. Secara teoritis ada 3 teori yang mengemukakan terbentuknya NO_x, yaitu:

a. Thermal Nox (Extended Zeldovich Mechanism)

Nox terjadi pada temperatur sekitar 2000 °K. Oleh sebab itu banyak teknik yang berusaha agar menjaga

suhu ruang bakar dibawah 2000 ⁰K agar dapat mengurangi NO_x.

b. Prompt Nox

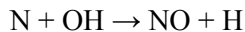
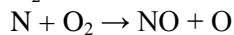
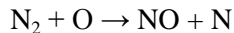
Formasi Nox ini akan terbentuk cepat pada zona pembakaran.

c. Fuel Nox

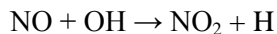
Nox formasi ini terbentuk karena kandungan N dalam bahan bakar. Menurut Heywood [13], NO_x terjadi saat proses pembakaran terjadi pada temperatur yang tinggi. Sumber terjadinya NO_x terjadi karena oksidasi nitrogen di lapisan atmosfer.

Rantai ikatan NO_x bereaksi dengan atomoksigen, dimana molekul oksigen teroksidasi pada temperatur yang tinggi pada proses pembakaran.

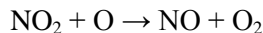
Reaksi kimia terbentuknya NO_x adalah sebagai berikut :



NO pada zona pembakaran terkonversi menjadi NO₂ seperti reaksi dibawah ini:



Berikutnya, konversi NO₂ menjadi NO_x:



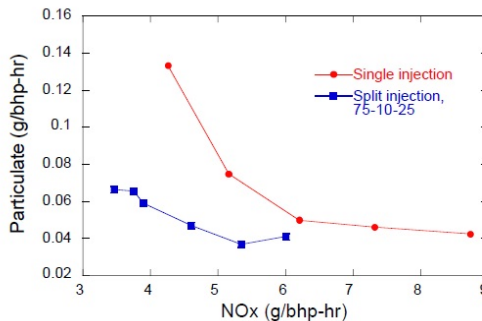
Nitrogen oksida yang ada di udara yang dihirup oleh manusia dapat menyebabkan kerusakan paru-paru. Setelah bereaksi dengan atmosfer zat ini membentuk partikel-partikel nitrat yang amat halus yang dapat menembus bagian terdalam

paru-paru. Selain itu zat oksida ini jika bereaksi dengan asap bensin yang tidak terbakar dengan sempurna dan zat hidrokarbon lain akan membentuk ozon rendah atau *smog* kabut berawan coklat kemerahan yang menyelimuti sebagian besar kota di dunia [14].

2.7 Penelitian Terdahulu

1. Penelitian Zhiyu Han, et al [4]

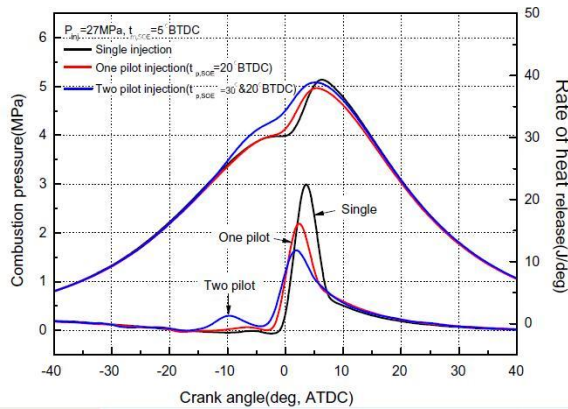
Sebuah studi numerik Zhiyu Han, Ali Uludogan, Gregory J Hampson, dan Rolf D. Reitz yang berjudul *Mechanism of Soot and Nox Emission Reduction Using Multiple Injection in a Diesel Engine* dari data komputasi menunjukkan bahwa dengan pre injeksi dengan 25 % dari total bahan bakar yang disemprotkan dalam 1 siklus secara signifikan mampu mengurangi produksi *soot* tanpa menambah persentase produksi *Nox* pada level yang signifikan. Ditampilkan oleh komputasi bahwa *soot emission* dapat dikurangi dengan injeksi split (pre-injeksi) dan split injeksi juga membuat injeksi timing dapat dimundurkan sehingga dapat mengurangi emisi *Nox*. Dengan memadukan split injection dan memundurkan timing injeksi bahan bakar maka baik *soot* dan *Nox* dapat secara signifikan dikurangi secara simultan.



Gambar 2.9 Hubungan pengaruh tipe injeksi terhadap *NOx* dan *Particulate* [4]

2. Penelitian Suh, Hyun Kyu [2]

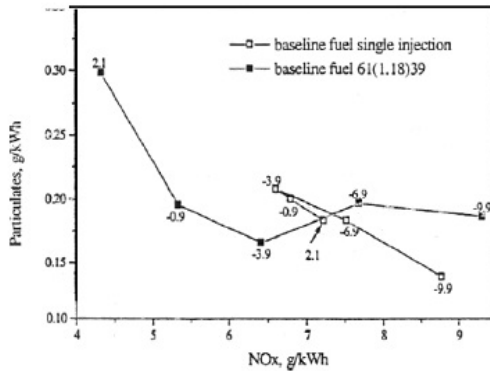
Studi eksperimental oleh Suh Hyun Kyu pada studi eksperimental menggunakan mesin diesel dengan rasio kompresi rendah menggunakan sistem injeksi bertingkat didapatkan bahwa penggunaan injeksi bertingkat mampu mengurangi produksi emisi terutama emisi NOx secara efektif, namun daya yang dihasilkan juga menurun. Injeksi bertingkat ditujukan agar tekanan dan temperatur puncak pembakaran tidak terlalu tinggi sehingga NOx berkurang.



Gambar 2.10 Effect of injection strategies on the combustion characteristics in low compression ratio engine [2]

3. Penelitian Choi, C.Y. et al [16]

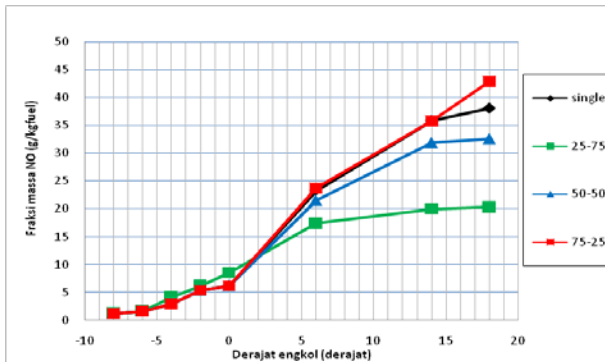
Studi numerik oleh Choi, C.Y. et al menunjukkan bahwa penggunaan multi injeksi mampu mengurangi produksi partikulat pada penggunaan biodiesel pada mesin diesel disaat beban kerja tinggi secara signifikan tanpa mempengaruhi laju produksi NOx.



Gambar 2.11 Particulate vs NOx for load baseline single and multiple injection [16]

4. Penelitian Bambang Sudarmanta, Soeharto Dan Sampurno [15]

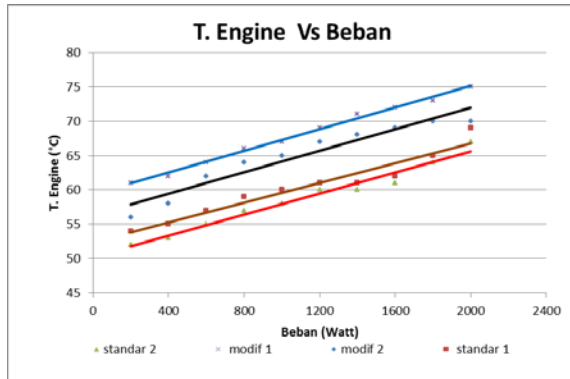
Sebuah studi numerik membandingkan sistem injeksi single dan dua tingkat pada semprotan bebas dan pada ruang bakar mesin diesel caterpillar 3406 serta pengaruhnya pada Emisi Gas NO menggunakan software Fluent 6.3.26 menunjukkan bahwa Laju kenaikan temperatur yang rendah pada injeksi 2 tingkat 25-75 pada simulasi numerik pembakaran di ruang bakar Caterpillar 3406 menyebabkan laju kenaikan fraksi massa emisi NO-nya menurun 32,2 % dibandingkan dengan injeksi single state.



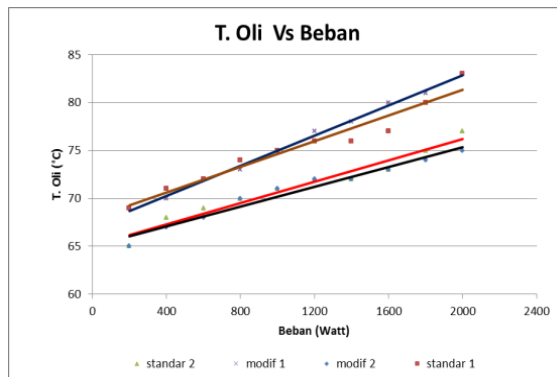
Gambar 2.12 Produksi NO_x terhadap derajat engkol dan tipe injeksi [14]

5. Penelitian M. Mujib Saifulloh [6]

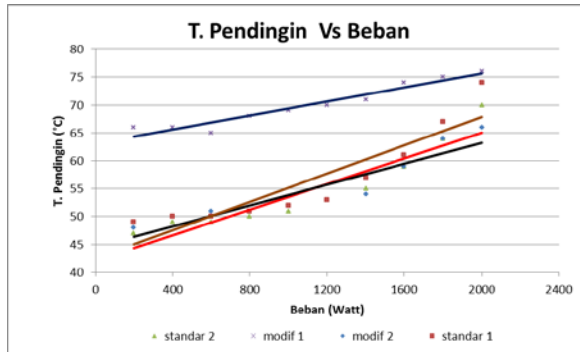
Untuk Analisa Temperatur Engine, Oli Pelumas dan Pendingin melakukan eksperimen dengan bahan bakar biodiesel kemiri sunan dengan perubahan *camshaft fuel pump* menggunakan mesin *diamond type Di 800*. Tren grafik menunjukkan seiring bertambahnya beban, temperatur engine, oli dan pendingin cenderung naik pada modif 1. Hal ini dimungkinkan akibatkan peningkatan temperatur gas buang pada modif 1 terlalu tinggi mempengaruhi saluran gas buang yang menempel pada mesin sehingga beban pendinginan juga semakin besar yang mengakibatkan temperatur pada Engine, Oli pelumas dan Radiator juga mengalami peningkatan meskipun tidak signifikan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.13 (a) Grafik Temperatur Engine Terhadap Beban. (b) Grafik Temperatur Oli Terhadap Beban. (c) Grafik Temperatur Pendingin Terhadap Beban

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODE PENELITIAN

Dalam pendahuluan telah disebutkan bahwa tujuan ini adalah mendapatkan unjuk kerja sistem injeksi 2-tingkat dengan bahan bakar solar dan minyak jelantah serta perbandingannya, Dengan menggunakan mesin diesel Diamond DI 800 *generator set* mesin diesel 1 silinder. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Pembakaran Bahan Bakar Jurusan Teknik Mesin ITS. Metode yang akan digunakan dalam pengujian adalah dengan menggunakan pengujian kecepatan konstan (*constant speed test*). Pengujian dilakukan dengan menaikkan putaran mesin hingga mesin mencapai putaran optimum kemudian generator dinyalakan dan diberikan pembebanan lampu. Kemudian diukur tegangan dan arus output dari generator kemudian mengukur waktu konsumsi 20 ml bahan bakar dan mengukur temperatur gas buang, temperatur engine, temperatur oli pelumas, dan temperatur radiator.

3.1 Proses Pembuatan Dan Alat Yang Digunakan Saat Pembuatan Biodiesel.

Bahan-bahan dan peralatan yang diperlukan untuk membuat biodiesel dari minyak jelantah diperlukan bahan-bahan lain seperti methanol 99% dan soda api (NaOH) dengan peralatan ember plastik, gelasukur, panci, kompor, sarung tangan karet, timbangan, pompa udara akuarium, kain katun tipis untuk penyaring, dan selang. Untuk perbandingan pembuatan biodiesel minyak jelantah (NaOH) 1% dari minyak jelantah dan *metanol* 40% dari minyak jelantah.

a) Variabel Tetap:

- Temperatur $= 60^{\circ} - 70^{\circ}\text{C}$
- Lama Transesterifikasi $= 60$ menit
- Jumlah Soda Api (NAOH) $= 1$ gram
- Jumlah *Metanol* $= 800$ ml

Minyak jelantah yang digunakan dalam percobaan 1 liter.

b) Prosedur Percobaan

Berikut ini akan dijelaskan rincian dari diagram alir percobaan pada gambar 2.3 dalam pembuatan biodiesel ini:

Alat-alat yang digunakan:

- Hot Plate (pemanas listrik), Termo meter untuk mengontrol suhu, Mixer atau stirrer. peralatan ember plastik, gelas ukur, panci, kompor, sarung tangan karet, timbangan, pompa udara akuarium, kain katun tipis untuk penyaring, dan selang.

➤ Reaksi Transesterifikasi

1. Memanaskan minyak di hotplate/kompor hingga temperaturnya mencapai kurang lebih 60° - 70° C sambil dilakukan pengadukan agar panasnya merata. Pengadukan dilakukan dengan kecepatan sedang dan jangan sampai terbentuk pusaran. Menambahkan bahan pelarut (*metoxida*) dibuat dengan mencampurkan 40% ml methanol dan 1 gram NaOH hingga larut selama 15 menit.



Gambar 3.1 Hasil Metoxide

2. Campurkan *metoxida* kedalam ember berisi 1 liter minyak jelantah, tuangkan *metoxida* perlahan-lahan sampek tercampur rata dan jaga suhu pada waktu pemasakan $60-70^{\circ}\text{C}$ dan aduk memakai sendok selama 60 menit dan temperatur dijaga agar tetap konstan.



Gambar 3.2 Hasil proses pemasakan

3. Setelah selesai tuangkan kedalam ember dan diamkan 4-12 jam sampai terjadi pengendapan pada lapisan bawah terpisah dengan ester yang berada pada lapisan atas.
4. Pengendapan ditandai dengan dua lapisan berbeda warna dengan lapisan gelap berada di bawah yang disebut *crude gliserin*, sedangkan lapisan atas berwarna bening, *crude BD*.



Gambar 3.3 Hasil Proses Pemisahan Crude Gliserin, Sedangkan Lapisan Atas Berwarna Bening, Crude BD

➤ ***Tahap Pencucian***

5. Pisahkan *crude biodiesel* dari *crude gliserin* lalu masukkan ke ember untuk dicuci dengan cara mencampurkan *aquades* sebanyak 500 ml untuk melarutkan sisa-sisa garam dan sabun yang terbentuk serta masih tertinggal dalam ester.
6. Pompa kan udara melalui pompa udara akuarium dan biarkan beberapa saat sehingga muncul warna putih susu kemudian pisahkan *crude biodiesel* yang berwarna kuning dengan air warna putih melalui selang.

➤ ***Pengeringan (penghilang kadar air)***

7. setelah pencucian selesai kemudian dilakukan proses pengeringan untuk menghilangkan sisa air yang masih terkandung didalam metil ester selama proses pencucian berlangsung. Kandungan air yang tersisa dihilangkan dengan cara dipanaskan hingga temperatur 100°C agar air yang masih terkandung didalam metil ester tersebut dapat menguap sambil dilakukan pengadukan.



Gambar 3.4 Hasil Produksi Biodiesel

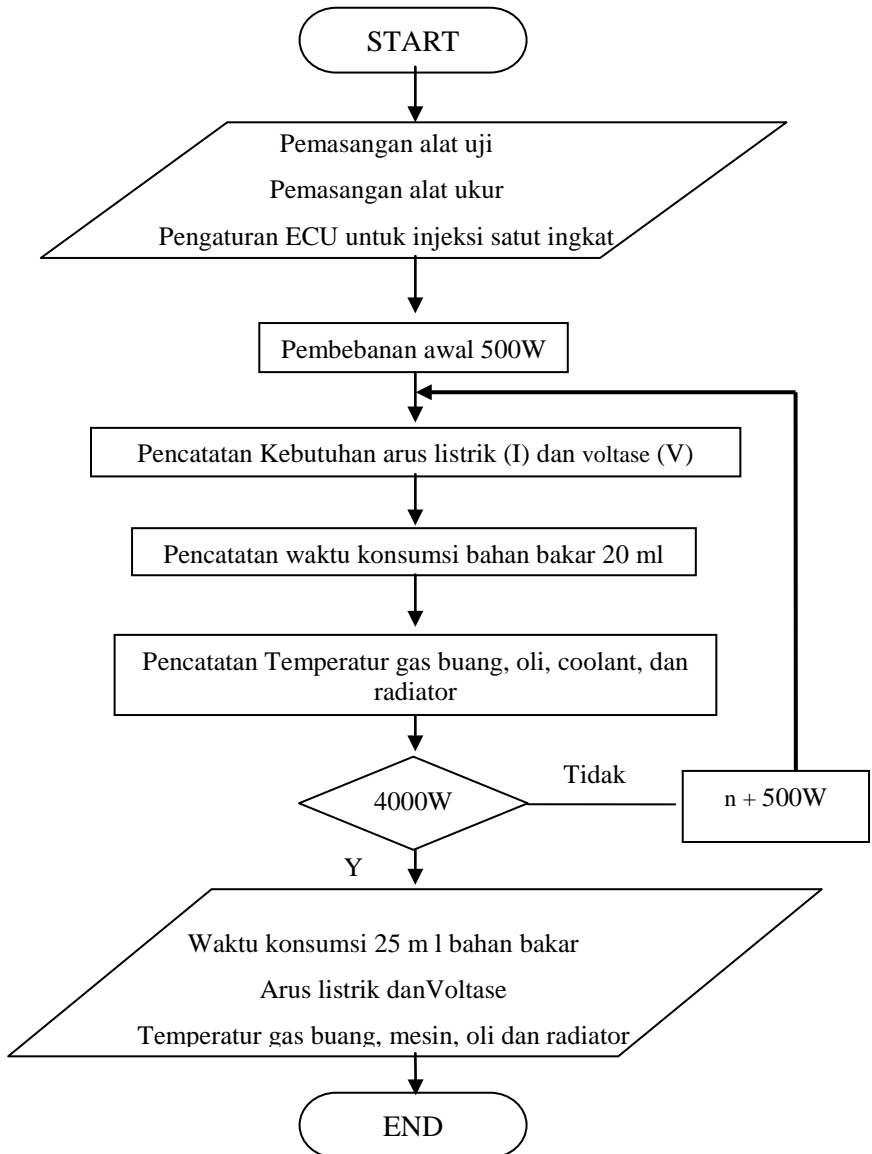
➤ ***Pengujian Karakteristik***

Setelah produk metilester yang dihasilkan tersebut menjalani serangkaian proses pencucian dan pengeringan (penghilang kadar air), maka *metil ester* tersebut pada dasarnya telah siap untuk digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel (biodiesel). Namun sebelum digunakan sebagai bahan bakar terlebih dahulu dilakukan pengujian karakteristik dengan tujuan mengetahui apakah biodiesel tersebut benar-benar dapat digunakan sebagai bahan bakar mesin diesel serta mengetahui bahwa bahan bakar tersebut dapat digunakan tanpa menimbulkan masalah pada mesin diesel.

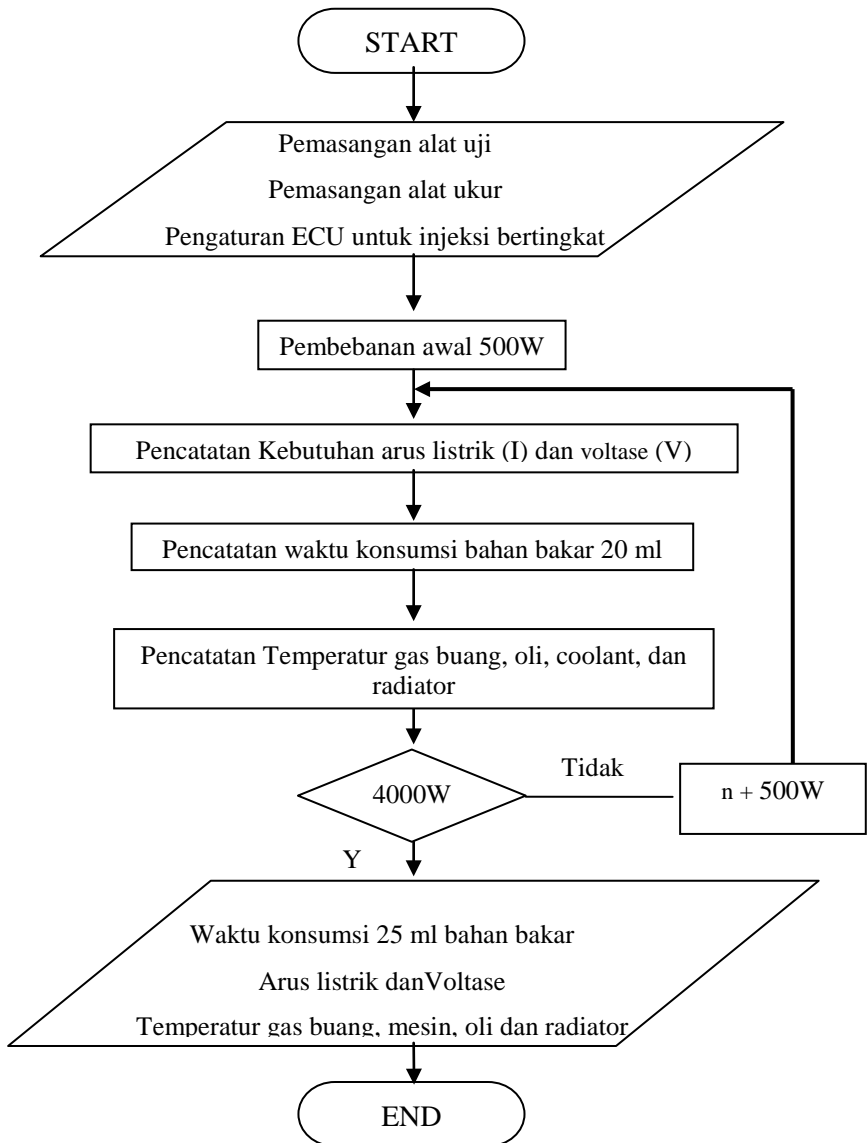
Untuk itu hasil pengujian karakteristik yang akan diperoleh nantinya sangat diharapkan dapat mendekati karakteristik dari petrodiesel yaitu berupa solar ataupun minyak diesel lainnya. Adapun beberapa karakteristik yang dianggap penting dan akan dilakukan pengujian yaitu viskositas (kekentalan), massa jenis, flash point, nilai kalor.

3.2 Diagram Alir Penelitian

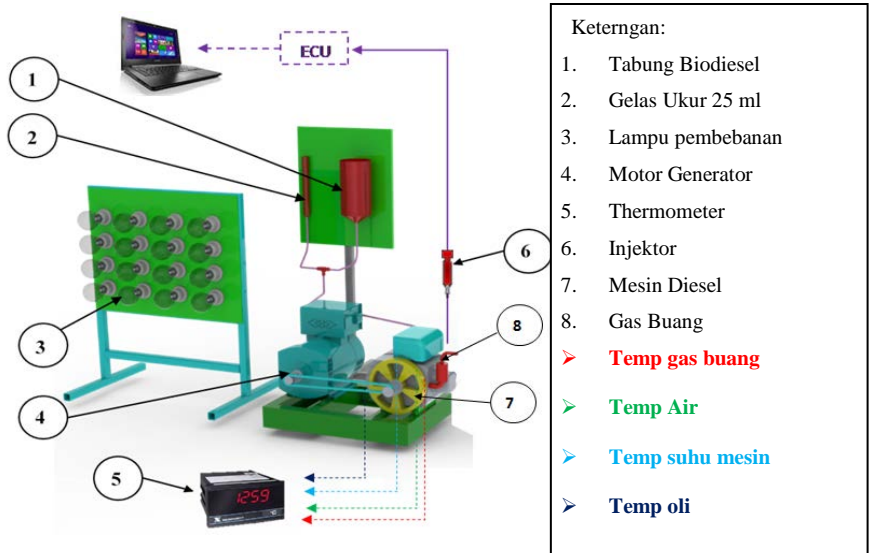
3.2.1 Diagram Alir Injeksi Satu Tingkat



3.2.2 Diagram Alir Injeksi Bertingkat



3.3 Skema Peralatan



Gambar 3.5 Skema Peralatan Uji Unjuk Kerja

3.4 Peralatan Penelitian

Pada penelitian yang dilakukan, peralatan uji yang dipergunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 3.6 Mesin Diesel Di 800

1. Mesin diesel 4 (empat) langkah dengan spesifikasi :

- Merek : Diesel Diamond
- Type : DI 800
- Model : 1 Silinder Diesel 4 Langkah
- Bore dan Stroke : 82 mm x 78 mm
- Displacement : 411 cc
- Max Power : 8Hp (6 KW) / 2400 rpm
- Continous Power : 7 HP (5,22 KW) / 2200 rpm
- Compression Ratio : 18 : 1
- Cooling System : *Hopper / Condensor*
- Lube Capacity : 1,8 liter

2. Generator



Gambar 3.7 Generator Daiho

- Type : ST-6
- Volt – Ampere : 230 V – 26,1 A (AC)
- Max AC Output : 6 KW
- Frequency : 50 Hz
- Loading System : *Electric Bulb System*

- Putaran : 2500 rpm
- Electric Control : *Volt, Amperemeter, Switch*

3. Solenoid Injektor

Solenoid Injektor yang akan digunakan dalam penelitian ini merupakan produk yang ada dan dijual dipasaran yang sesuai dengan kriteria yang diinginkan yaitu mampu menginjeksi biodiesel dalam beberapa tingkat dalam 1 siklus dan dapat dikontrol secara elektris laju injeksinya.

- Merk : Denso
- Type : Selenoid Common Rail Injector 1KD
- Impedance : High Impedance Injector



Gambar 3.8 Injektor Standar Toyota Kijang Innova D4D

4. ECU



Gambar 3.9 ECU DECS

- Merk : DECS
- Type : Programmable ECU

5. Sensor Crank Position



Gambar 3.10 Sensor Crank

- Merk : Suzuki
- Range : 0-12000rpm

6. ACCU



Gambar 3.11 ACCU Yuasa

- Merk : Yuasa
- Tipe : NS-60
- Kapasitas : 12V – 45A

7. ACCU Charger



Gambar 3.12 ACCU Charger

- Merk : Krisbow
- Tipe : KW19-652
- Kapasitas : 12V-24V, 5A-20A

3.5 Alat Ukur

Alat ukur yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Digital Oscilloscope



Gambar 3.13 Atten Digital Oscilloscope

- Merk : ATTEN
- Type : ADS 1102 CAL
- Bandwidth : 100MHz
- Channel : 2

- Trigger type :Edge, Pulse, Slope, Alternative, Delay
 - Range : 2.5ns – 50s
 - Display : LCD TFT 7 inch
 - Sensitivity : 2mV – 10V
 - Cursor Measure : Manual, Track, Auto
2. Tabung ukur konsumsi bahan bakar
- Merek :IWAKI pyrex
 - Kapasitas :25ml
 - Akurasi :0,03 ml



Gambar 3.14 Iwaki Pyrex

3. Amperemeter



Gambar 3.15 Amperemeter Dekco

- Merk :Dekco
- Type :37
- Range Arus :Max. 1000 Ampere AC

4. Voltmeter

*Gambar 3.16 Voltmeter Dekco*

- Merk :Dekco
- Type :37
- Range Arus :Max. 1000 Volt DC dan Max 750 Volt DC

5. Stop Watch

*Gambar 3.17 Casio Stopwatch*

- Merk :Casio
- Tipe :HS-3
- Akurasi :0.01 detik

6. Beban lampu



Gambar 3.18. Beban Lampu 4000 Watt

Beban lampu terdiri atas lampu pijar sebanyak 8 buah dengan konsumsi daya masing-masing lampu sebesar 500 Watt. Lampu-lampu tersebut disusun secara parallel dengan masing-masing lampu dilengkapi dengan tombol stop/kontak untuk pengaturan beban.

7. Thermocouple



Gambar 3.19 Thermocouple Type-K

- Tipe : Type-K
- Range : -190°C s/d 1260°C

8. Thermometer digital



Gambar 3.20 Thermometer Digital

- Merek : PATOS
- Tipe : Type-K
- Range : 0°C-1300°C

3.6 Perencanaan Penelitian

Setelah genset terpasang baik pada dudukannya, dilakukan persiapan pengujian:

1. Sebelum menghidupkan genset dilakukan pemeriksaan terhadap minyak pelumas, filter, system kelistrikan, dan lampu beban sehingga genset siap digunakan.
2. Pengecekan terhadap alat ukur yang akan digunakan dalam pengujian.
3. Saluran bahan bakar dibuka.
4. Engine dihidupkan selama 5 menit sampai engine mencapai kondisi kerjanya.

3.6.1 Pengujian

Tahapan pengujian adalah sebagai berikut:

1. Pemberian beban pada genset dengan cara menyalakan 1 buah lampu (500 watt)
2. Pengukuran dan konsumsi bahan bakar dengan cara menghitung (dengan stopwatch) waktu yang diperlukan genset untuk menghabiskan 25 mL bahan bakar. Waktu konsumsi 25 mL bahan bakardicatat.

3. Pengukuran dan pencatatan tegangan (voltmeter) output genset
4. Pengukuran dan pencatatan kuat arus (ampere) output genset.
5. Selanjutnya pengukuran dilakukan dengan menaikkan beban dari 500 watt sampai 4000 watt dengan banyak jumlah data sebanyak 8 titik.
6. Setelah pengujian selesai, beban dilepaskan satu persatu.
7. Generator dimatikan
8. Engine dimatikan.
9. Saluran bahan bakar ditutup.

Tabel 3.1 Parameter – Parameter Eeksperimen

Parameter Input		Parameter Output		Hasil
Parameter Tetap	Parameter Berubah	Pengukuran	Perhitungan	Grafik (fungsi beban)
<ul style="list-style-type: none"> Bahan Bakar Biodiesel Spesifikasi engine standar dengan injeksi satu tingkat Spesifikasi engine standar dengan injeksi bertingkat Kondisi putaran mesin tetap 2000 rpm 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan bahan bakar biodiesel dengan tingkat injeksi mulai satu tingkat 100% dan Bertingkat 70%-30%, 50% - 50% dan 30% - 70% Pembebebanan genset mulai 500 watt hingga 4000 watt 	<ul style="list-style-type: none"> V dan I Waktu konsumsi 25ml bahan bakar Unjuk kerja mesin diesel Suhu Mesin, Pelumas, Gas buang, air pendingin dan emisi gas buang NO_x 	<ul style="list-style-type: none"> Ne BMEP SFC Effisiensi thermal Torsi 	<ul style="list-style-type: none"> Ne BMEP SFC η_{th} Torsi Temp . Gas buang Temp . Oli Temp . Radiator Temp . Engine Emisi gas buang NO_x

BAB IV

PERHITUNGAN DAN ANALISA

4.1 Pengambilan Data

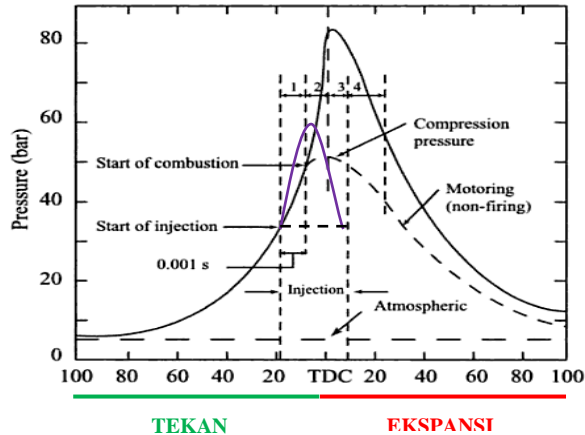
Pada bab ini akan dibahas mengenai proses karakterisasi dengan penentuan settingan pada injeksi satu tingkat dan injeksi bertingkat, dan perhitungan-perhitungan yang diperlukan dalam penelitian, serta analisa grafik yang diperoleh dari perhitungan. Perhitungan yang dimaksud adalah perhitungan unjuk kerja mesin (daya, torsi, bmep, sfc dan efisiensi thermis). Adapun untuk data hasil penelitian seluruhnya bisa dilihat pada lampiran.

4.2 Durasi Buka Injeksi Bahan Bakar Biodiesel Pada Mesin Diamond Type Di 800

Durasi injeksi merupakan lamanya injektor menginjeksikan bahan bakar biodiesel ke ruang bakar melalui *intake manifold*. Bahasa pemrograman yang diterima ECU untuk durasi injeksi adalah dalam bentuk besaran waktu *millisecond* (ms). Untuk mengkonversi durasi injeksi dari besaran derajat *crank angle* (°CA) pada putaran mesin konstan 2000 rpm ke dalam satuan waktu dapat dilakukan perhitungan, sebagai berikut :

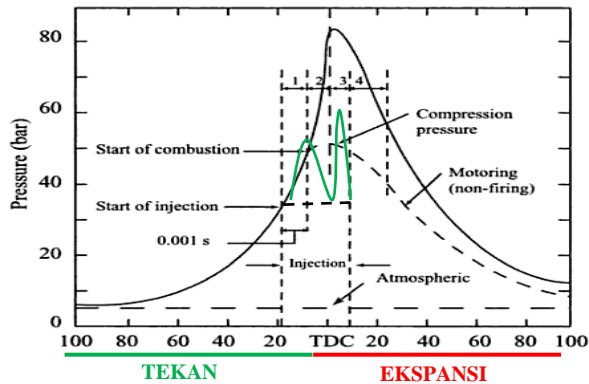
$$\begin{aligned} \text{DurasiInjeksi} &= 125^{\circ} \times \frac{1 \text{ rev}}{360^{\circ}} \times \frac{1 \text{ min}}{2000 \text{ revolution}} \times \frac{60 \text{ sec}}{1 \text{ min}} \times \frac{1000 \text{ msec}}{1 \text{ sec}} \\ &= 10 \text{ ms} \end{aligned}$$

4.3 Grafik Injeksi Satu Tingkat Dan Grafik Injeksi Bertingkat



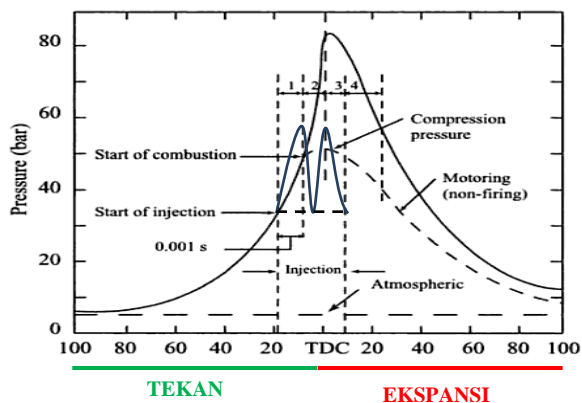
Gambar 4.1 Grafik Injeksi 100% Pada Mesin Diesel

Pada grafik *injeksi 100%* diatas atau single fuel menjelaskan bahwa penginjeksian bahan bakar didalam ruang bakar dilakukan satu kali didalam satu proses kerja mesin. Sehingga pada single fuel ini terjadi kenaikan temperatur sehingga timbul adanya jelaga karena terjadi penumpukan bahan bakar didalam ruang bakar maka prosentasi terjadinya emisi gas buang Nox lebih besar.



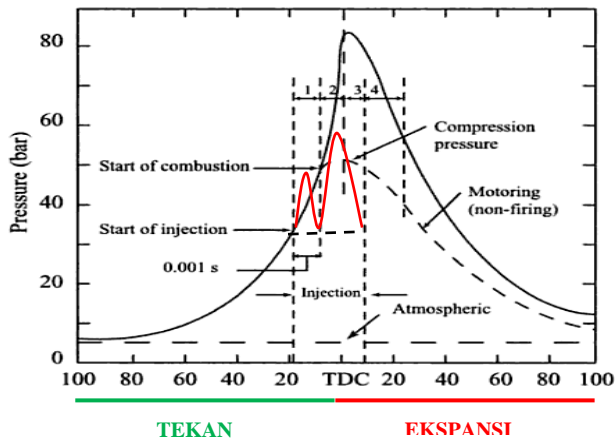
Gambar 4.2 Grafik Injeksi 70%-30% Pada Mesin Diesel

Pada grafik injeksi 70%-30% dilakukan penginjeksian dua kali didalam satu siklus kerja pada durasi waktu 7ms pada penginjeksian yang pertama kemudian 3ms pada penginjeksian yang kedua sehingga dapat mengurangi penumpukan bahan bakar yang terjadi didalam ruang bakar. Diharapkan dapat mengurangi emisi gas buang Nox dibandingkan single fuel karena pada proses ini terjadi proses penginjeksian bahan bakar secara bertingkat didalam ruang bakar.



Gambar 4.3 Grafik Injeksi 50%-50% Pada Mesin Diesel

Pada grafik injeksi 50%-50% dilakukan penginjeksian dua kali didalam satu siklus kerja pada durasi waktu 5ms pada penginjeksian yang pertama kemudian 5ms pada penginjeksian yang kedua. Diharapkan pada variasi injeksi bertingkat ini prosentase terjadinya Nox lebih kecil dibandingkan pada single fuel.

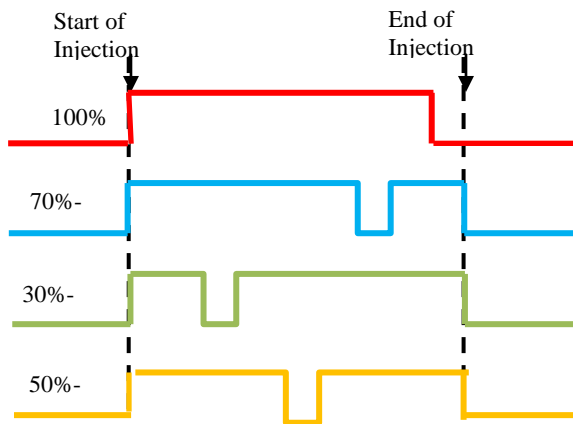


Gambar 4.4 Grafik Injeksi 30%-70% Pada Mesin Diesel

Pada grafik injeksi 30%-70% dilakukan penginjeksian dua kali didalam satu siklus kerja pada durasi waktu 3 ms pada penginjeksian yang pertama kemudian 7ms pada penginjeksian yang kedua sehingga dapat mengurangi penumpukan bahan bakar yang terjadi didalam ruang bakar. Diharapkan dapat mengurangi emisi gas buang Nox secara berlebihan dibandingkan single fuel karena pada proses ini terjadi proses penginjeksian bahan bakar secara bertingkat didalam ruang bakar.

4.4 Karakteristik Injeksi Bertingkat Pada Injektor Solenoid

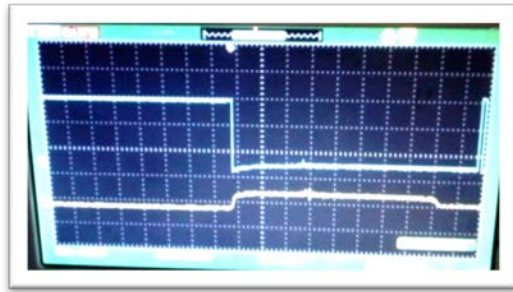
Dengan menggunakan settingan yang sama dengan settingan injeksi satu tingkat yaitu settingan durasi bukaan injektor selama 10ms lalu dilakukan settingan pada ECU untuk sistem injeksi bertingkat 70%-30%, 50%-50%, dan 30%-70%. Pada settingan 70%-30% pada injeksi yang pertama injektor diatur agar membuka selama 7ms kemudian injeksi yang kedua selama 3 ms sedangkan jeda (*dwell time*) yang digunakan adalah selama 1ms. Pada Settingan 50%-50% dan 30%-70% juga dilakukan hal yang sama dengan memberikan jeda (*dwell time*) selama 1ms. Skema durasi injeksi bertingkat 70%-30%, 50%-50%, dan 30%-70% dapat dilihat pada gambar 4.5



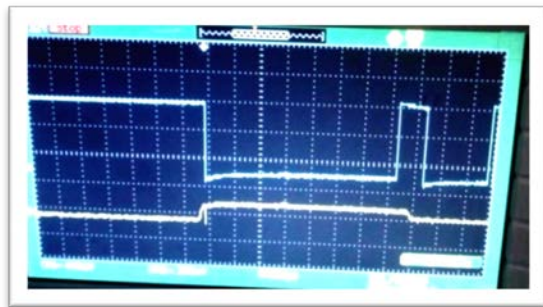
Gambar 4.5 Skema Profil Injeksi Bertingkat Pada Mesin Diesel

Pada grafik *oscilloscope* sinyal input pada ECU berwarna kuning (bawah) yaitu sinyal yang dihasilkan oleh pulser yaitu berupa tegangan rendah yang berbentuk sinyal high (membentuk kurva naik) sedangkan output yang

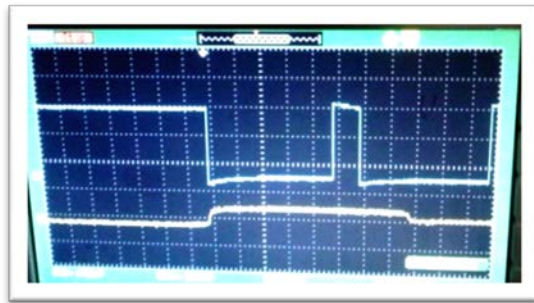
berwarna biru (atas) yang dihasilkan berupa sinyal low (membentuk kurva turun). Hal ini diakibatkan oleh spesifikasi injector yang membutuhkan tegangan input yang sangat besar agar dapat bekerja, maka ECU harus memiliki driver pembangkit sehingga pada ECU sinyal output low menghasilkan output yang akurat.



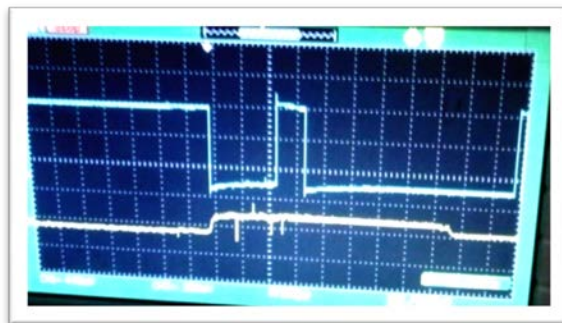
Gambar 4.6 Grafik Oscilloscope injeksi tunggal yang dihasilkan oleh ECU



Gambar 4.7 Grafik Oscilloscope injeksi 70%-30% yang dihasilkan oleh ECU



Gambar 4.8 Grafik Oscilloscope injeksi 50%-50% yang dihasilkan oleh ECU



Gambar 4.9 Grafik Oscilloscope injeksi 30%-70% yang dihasilkan oleh ECU

4.5 Propertis Bahan Bakar Biodiesel Minyak Jelantah

Bahan Bakar yang digunakan adalah Biodiesel yang berasal dari minyak goreng bekas spesifikasi bahan bakar yang digunakan ditunjukkan pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Properties Bahan Bakar Biodiesel B-1090 Minyak Jelantah

No	Karakteristik	Satuan	Nilai	SNI 04-7182-2012
1	Massa jenis pada 40°	Kg/m ³	860	850 - 890
2	Viskositas kinematic pada 40°C	mm ² /s	3,8	2,3 - 6
3	Flash Point	°C	145	Min. 100
4	Nilai Kalor Bawah (NKB)	kJ/Kg	39540	-
5	Angka Cetane	-	64	Min.50

4.6 Perhitungan Dan Analisa

Untuk memudahkan dalam menganalisa dan mengambil kesimpulan dilakukan perhitungan-perhitungan data hasil percobaan dan hasilnya ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik. Berikut adalah contoh perhitungan yang diambil dari data percobaan menggunakan sistem injeksi satu tingkat. Data-data yang diperoleh adalah :

- Tegangan (V) = 220 Volt
- Arus (I) = 17,5 Ampere
- Waktu konsumsi 25 ml bahan bakar (s) = 56 detik
- Putaran motor (n) = 2000 rpm

4.6.1 Daya Efektif (Ne)

Daya mesin merupakan daya yang diberikan untuk mengatasi beban yang diberikan. Daya yang dihasilkan pada mesin diesel yang dikopel dengan *generator* listrik dapat dihitung berdasarkan beban pada *generator* listrik dan dinyatakan sebagai daya efektif pada *generator* (Ne). Hubungan tersebut dinyatakan dengan persamaan (2.1), yaitu :

$$Ne (W) = \frac{V \times I \times \cos \theta}{\eta_{gen} \times \eta_{transmisi}}$$

Dimana :

- $\cos \theta = 1$
- $\eta_{generator} = 0,9$
- $\eta_{transmisi} = 0,95$

Daya untuk percobaan injeksi bertingkat 100% - 0% *biodiesel* beban 4000 watt, dengan data sebagai berikut :

$$Ne = \frac{220 \times 17,5 \times 1}{0,9 \times 0,95}$$

$$Ne = 4502,92 \text{ Watt}$$

4.6.2 Torsi (Mt)

Torsi merupakan gaya yang bekerja pada poros engkol (*crankshaft*). Torsi pada penelitian ini dihitung dengan menggunakan persamaan (2.2) yaitu :

$$Mt(Nm) = \frac{60 \times Ne \text{ (watt)}}{n \text{ (rev/min)}} \times \frac{1J}{1W \cdot s} \times \frac{60s}{1min} \times \frac{1rev}{2\pi} \times \frac{1Nm}{1J}$$

Torsi untuk percobaaninjeksi bertingkat 100%-0% *biodiesel* beban 4000 watt,dengan data sebagai berikut :

$$Mt = \frac{4502,92 \text{ (watt)}}{2000 \text{ (rev/min)}} \times \frac{1 \cancel{J}}{1 \cancel{W} \cdot s} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \cancel{min}} \times \frac{1 \cancel{rev}}{2\pi} \times \frac{1 \text{ Nm}}{1 \cancel{J}}$$

$$Mt = 67,544 \text{ Nm}$$

4.6.3 Brake Mean Effective Pressure (BMEP)

Brake mean effective pressure atau tekanan efektif rata-rata teoritis bekerja sepanjang *volume* langkah *piston* sehingga menghasilkan daya yang besarnya sama dengan daya efektif. BMEP pada penelitian ini dihitung dengan menggunakan persamaan (2.3) yaitu :

$$bmep(kpa) = \frac{Ne(kw) \times z \times 10^3}{V(dm^3) \times n \text{ (rev / sec)} \times i}$$

Brake mean effective pressure untuk percobaan injeksi bertingkat 100%-0% biodiesel beban 4000 watt, dengan data sebagai berikut :

$$bmep(kPa) = \frac{4,50 \text{ kW} \times 2 \text{ rev} \times 10^3}{0,4119193 \text{ dm}^3 \times 33,33 \text{ rev/sec} \times 1}$$

$$bmep(kPa) = 655,96 \text{ kpa}$$

4.6.4 Spesifik Fuel Consumption (Sfc)

Specific fuel consumption (Sfc) adalah jumlah bahan bakar yang dipakai mesin untuk menghasilkan daya efektif 1 (satu) *hp* selama 1 (satu) jam. *Sfc* pada penelitian ini dihitung dengan menggunakan persamaan (2.4) yaitu :

Konsumsi bahan bakar spesifik untuk percobaan injeksi bertingkat 100%-0% *biodiesel* beban 4000 watt, adalah sebagai berikut :

$$sfc = \frac{\dot{m}_{bb} \times 3600 \text{ (kg/s)}}{Ne \text{ (kW.jam)}}$$

$$sfc = \frac{0,00038354 \times 3600 (kg/s)}{3,345 (kW.jam)}$$

$$sfc = 0,307 (kg/kW.jam)$$

Untuk menghitung laju alir massa bahan bakar biodiesel (*biodiesel mass flowrate*) digunakan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{m}_{biodiesel} = \frac{m_{biodiesel}}{t_{biodiesel}} \frac{kg}{s}$$

Dimana massa minyak biodiesel didapat dari :

$$m_{biodiesel} = \rho_{biodiesel} \times V_{biodiesel}$$

$$m_{biodiesel} = 860 \frac{kg}{m^3} \times 0,000025 m^3$$

$$m_{biodiesel} = 0,02147 kg$$

Volume minyak biodiesel 25 cc = 0,000025 m³ menghabiskan waktu 56detik maka laju aliran massa biodieseldengan :

$$\dot{m}_{biodiesel} = \frac{0,02147 kg}{56 s}$$

$$\dot{m}_{biodiesel} = 0,00038354 kg/s$$

4.6.5 Efisiensi Thermal

Efisiensi termal adalah ukuran besarnya pemanfaatan energi panas yang tersimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif oleh mesin pembakaran dalam. Secara teoritis dituliskan dalam sesuai dengan persamaan (2.5) yaitu :

Nilai efisiensi thermal untuk percobaan injeksi bertingkat 100%-0% *biodiesel* beban 4000 watt, adalah sebagai berikut :

$$\eta_{thermal} = \frac{Ne}{\dot{m}_{biodiesel} \times NKB} \times 100\%$$

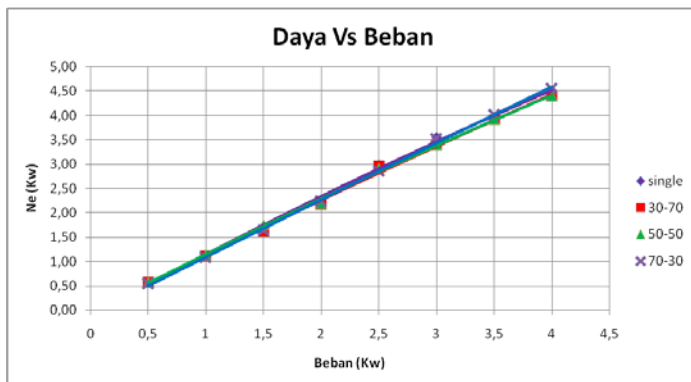
$$\eta_{thermal} = \frac{4,50 \text{ kW}}{0,00038354 \text{ kg/s} \times 39540 \text{ kJ/kg}} \times 100\%$$

$$\eta_{thermal} = 29,692 \%$$

4.6.6 Analisa Unjuk Kerja

a. Analisa Daya

Daya motor merupakan kemampuan engine untuk menghasilkan kerja tiap satuan waktu. Daya ini digunakan untuk mengatasi beban yang diterima motor, yang dalam penelitian ini digunakan untuk membangkitkan listrik pada generator. Dari gambar 4.10 terlihat bahwa semakin besar penambahan beban, maka daya yang dihasilkan akan semakin besar. Untuk mengatasi beban yang semakin besar dan membuat putaran motor konstan, maka bahan bakar yang diinjeksikan semakin banyak, sehingga pembakaran yang terjadi lebih besar. Pembakaran yang besar mengakibatkan naiknya daya.

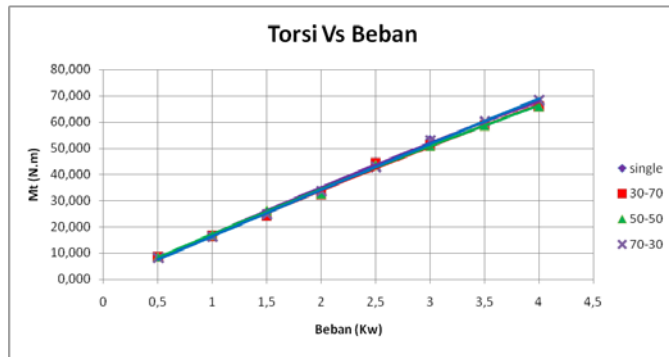


Gambar 4.10 Grafik Daya vs Beban

Injeksi satu tingkat memiliki nilai daya yang lebih besar dibandingkan dengan injeksi bertingkat. Pada variasi injeksi bertingkat, variasi injeksi 70%-30% memiliki nilai daya lebih besar dibandingkan variasi 50%-50% sedangkan variasi 30%-70% memiliki nilai daya terkecil meskipun terlihat berimpitan. Hal ini bisa terjadi akibat perbedaan jumlah bahan bakar yang diinjeksikan pada injeksi tingkat pertama sehingga daya yang dihasilkan oleh injeksi satu tingkat lebih baik dari injeksi 70%, 30%, 30%-70% dan 50%-50% pada tingkat pertama. Selain itu, penurunan daya ini juga dapat diakibatkan kurang konstannya tekanan injeksi bahan bakar pada injeksi tingkat kedua sehingga atomisasi bahan bakar pada injeksi tingkat kedua menjadi kurang baik.

b. Analisa Torsi

Torsi merupakan kemampuan engine untuk mengatasi pembebanan. Berdasarkan gambar 4.11 dibawah, terlihat bahwa nilai torsi naik seiring dengan bertambahnya beban. Hal ini disebabkan dengan penambahan beban maka terjadi penambahan konsumsi bahan bakar pada engine. Penambahan bahan bakar tersebut dimaksudkan untuk mengatasi beban dan menjaga putaran engine tetap konstan, sehingga pembakaran yang terjadi lebih besar. Energi kalor bahan bakar yang diubah menjadi energi mekanik juga bertambah besar, yang merupakan representasi gaya dorong pada piston. Bila gaya dorong pada piston besar, maka torsi juga akan besar.



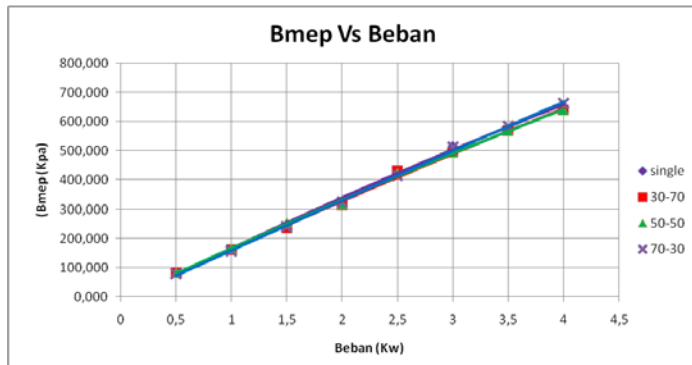
Gambar 4.11 Grafik Torsi vs Beban

Gambar diatas menunjukan injeksi bertingkat secara umum menurunkan nilai torsi dan besarnya lebih rendah dibandingkan injeksi satu tingkat. Penyebab rendahnya nilai torsi tersebut karena pada injeksi satu tingkat bahan bakar langsung diinjeksikan seluruhnya tanpa adanya jeda (*dwell time*) sehingga proses terjadinya pembakaran pada tahap pertama menjadi besar. Hal ini juga bisa terjadi akibat perbedaan jumlah bahan bakar yang diinjeksikan pada injeksi tingkat pertama sehingga torsi yang dihasilkan oleh injeksi satu tingkat lebih baik dari injeksi 30%-70%, 50%- 50%, dan 70%-30% pada tingkat pertama. Selain itu, penurunan daya ini juga dapat diakibatkan kurang konstannya tekanan injeksi bahan bakar pada injeksi tingkat kedua sehingga atomisasi bahan bakar pada injeksi tingkat kedua menjadi kurang baik.

c. Analisa Efektif Rata-Rata (BMEP)

Tekanan efektif rata-rata merupakan tekanan tetap teoritis yang bekerja sepanjang langkah volume piston sehingga menghasilkan daya yang besarnya sama dengan daya efektif. Dari gambar dibawah terlihat bahwa besar BMEP naik seiring dengan penambahan beban, hal ini disebabkan injeksi

bahan bakar kedalam ruang bakar yang semakin besar, sehingga pembakaran yang terjadi semakin besar, yang merupakan kompensasi untuk menjaga putaran engine konstan.



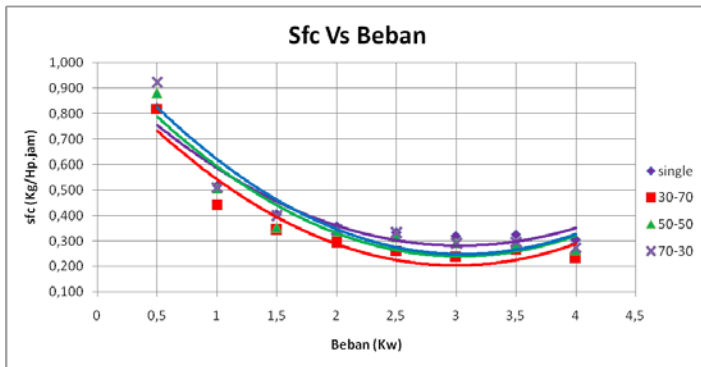
Gambar 4.12 Grafik BMEP vs Beban

Dibandingkan dengan injeksi satu tingkat, nilai bmep pada injeksi bertingkat cenderung lebih rendah meskipun garis nampak berhimpit. Hal ini bisa terjadi akibat perbedaan jumlah bahan bakar yang diinjeksikan pada injeksi tingkat pertama sehingga tekanan yang dihasilkan pada pembakaran oleh injeksi satu tingkat lebih baik dari injeksi 30%-70%, 50%- 50%, dan 70%-30% pada tingkat pertama. Selain itu, penurunan daya ini juga dapat diakibatkan kurang konstannya tekanan injeksi bahan bakar pada injeksi tingkat kedua sehingga atomisasi bahan bakar pada injeksi tingkat kedua menjadi kurang baik yang mengakibatkan tekanan rata rata yang dihasilkan juga lebih rendah.

d. Analisa Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC)

Konsumsi bahan bakar spesifik (specific fuel consumption) adalah ukuran pemakaian bahan bakar oleh

suatu engine, yang diukur dalam satuan massa bahan bakar per satuan waktu per satuan keluaran daya atau juga dapat didefinisikan sebagai laju aliran bahan bakar yang dipakai oleh motor untuk menghasilkan tenaga. Sfc merupakan representasi keefektifan engine dalam mengkonsumsi bahan bakar.



Gambar 4.13 Grafik SFC vs Beban

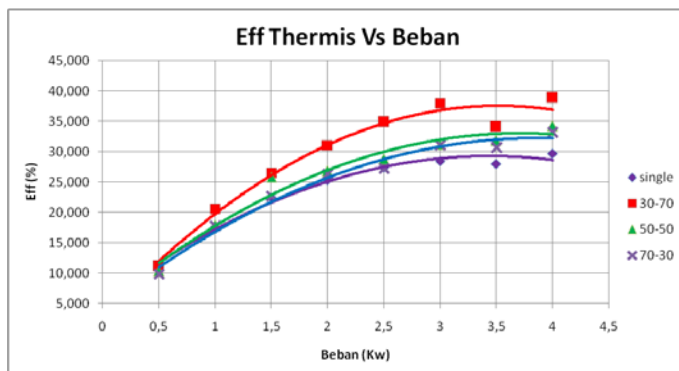
Gambar 4.13 menunjukkan bahwa dengan bertambahnya beban, pemakaian bahan bakar spesifik cenderung menurun. Penyebab fenomena tersebut adalah campuran bahan bakar dan udara yang terlalu miskin, sehingga untuk menghasilkan daya 1 hp dalam 1 jam membutuhkan lebih banyak bahan bakar. Seiring dengan bertambahnya beban serta peningkatan daya, engine semakin efektif dalam mengkonsumsi bahan bakar.

Pada injeksi satu tingkat nampak garis trenline Sfc lebih meningkat dibandingkan injeksi bertingkat, meskipun pada beban 1,5 kw injeksi satu tingkat nampak berhimpit dengan injeksi bertingkat pada variasi 70%-30% dan 50%-50% akan tetapi nilai dari injeksi satu tingkat lebih besar dibandingkan injeksi bertingkat sebesar 43,3%, 43% dan 41%. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah bahan bakar yang

diinjeksikan antara injeksi satu tingkat dan injeksi bertingkat memiliki kecenderungan nilai hampir sama pada variasi 70%-30% dan 50%-50%. Dalam perhitungan nilai sfc terendah dihasilkan oleh variasi injeksi 30%-70%, hal ini mungkin terjadi karena pada proses injeksi bertingkat penginjeksian bahan bakar yang diinjeksikan memiliki *dwelt time sehingga* memberikan kesempatan kepada bahan bakar yang telah diinjeksikan pada injeksi tahap pertama untuk terbakar lebih sempurna, sebelum kemudian diinjeksikan lagi bahan bakar pada tahap yang kedua. Sehingga terjadi pembakaran yang lebih baik yang mengindikasikan pada nilai Sfc paling rendah dibandingkan injeksi satu tingkat.

e. Analisa Efisiensi Thermal (η_{th})

Efisiensi thermal (η_{th}) adalah ukuran besarnya pemanfaatan energi panas yang tersimpan dalam bahan bakar untuk diubah menjadi daya efektif pada motor. Efisiensi thermal mengindikasikan besarnya perubahan energi kalor menjadi energi mekanik atau gerak.



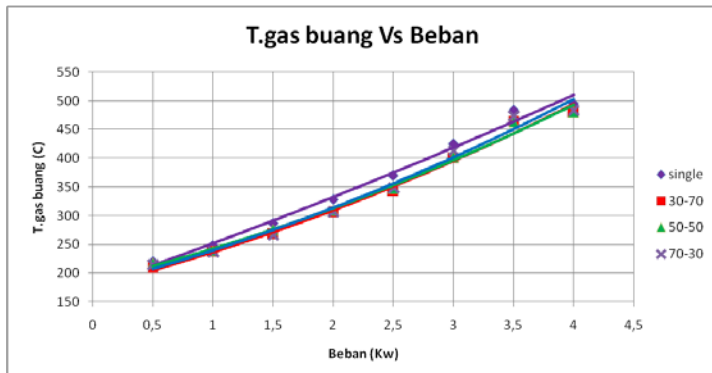
Gambar 4.14 Grafik Efisiensi Thermal vs Beban

Gambar 4.14 menunjukkan terjadinya peningkatan efisiensi thermal dengan bertambahnya beban. Pada beban rendah, efisiensi thermal engine bernilai rendah, dibandingkan single fuel karena pada proses ini terjadi pada proses penginjeksian secara bertingkat didalam ruang bakar dengan tekanan penginjeksian yang kedua lebih besar dibandingkan pada penginjeksian tingkat pertama, sehingga nilai efisiensi thermal pada sistem injeksi bertingkat mengalami kenaikan secara signifikan.

Pada variasi injeksi 30%-70% memiliki efisiensi thermal yang lebih baik kemudian disusul oleh variasi 50%-50% meskipun trenline garis berhimpit pada variasi 70%-30%, dan injeksi satu tingkat. Hal ini disebabkan oleh nilai sfc yang diperoleh semakin rendah sehingga menyebabkan nilai efisiensi thermal akan semakin tinggi.

f. Analisa Temperatur Gas Buang

Gambar 4.15 menunjukkan seiring bertambahnya beban, temperatur gas buang cenderung naik. Kenaikan ini disebabkan dengan bertambahnya jumlah kebutuhan bahan bakar untuk meningkatkan daya yang bertujuan kompensasi dari kenaikan beban. Volume bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar semakin banyak sehingga pembakaran yang terjadi akan semakin besar, sehingga temperatur gas buang ikut meningkat.



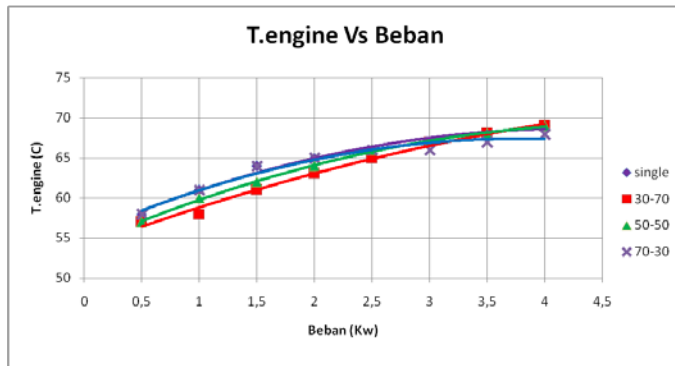
Gambar 4.15 Grafik T.Gas Buang vs Beban

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan temperatur gas buang dimana temperatur injeksi satu tingkat mengalami peningkatan temperatur gas buang yang signifikan dibandingkan injeksi bertingkat. Pada temperatur gas buang mengindikasikan bahwa penginjeksian *single fuel* didalam ruang bakar dilakukan satu kali didalam satu siklus kerja mesin diesel dengan tekanan yang tinggi. Sehingga pada single fuel ini terjadi kenaikan temperatur dibandingkan injeksi bertingkat. karena pada proses injeksi bertingkat penginjeksian bahan bakar yang diinjeksikan memiliki *dwel time* sehingga memberikan kesempatan kepada bahan bakar yang telah diinjeksikan pada injeksi tahap pertama untuk terbakar lebih sempurna, sebelum kemudian diinjeksikan lagi bahan bakar pada tahap yang kedua. Maka temperatur didalam ruang bakar pada injeksi satu tingkat lebih tinggi dibandingkan injeksi bertingkat dengan variasi injeksi 70%-30%, 50%-50%, dan 30%-70%.

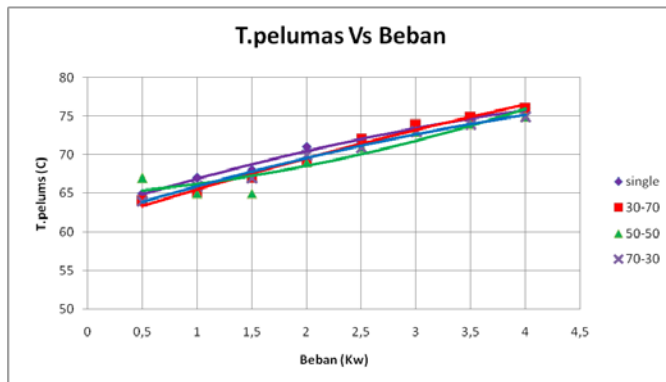
g. Analisa Temperatur Engine, Pelumas dan Pendingin

Tren grafik temperatur dibawah menunjukkan seiring bertambahnya beban, temperatur engine, pelumas dan

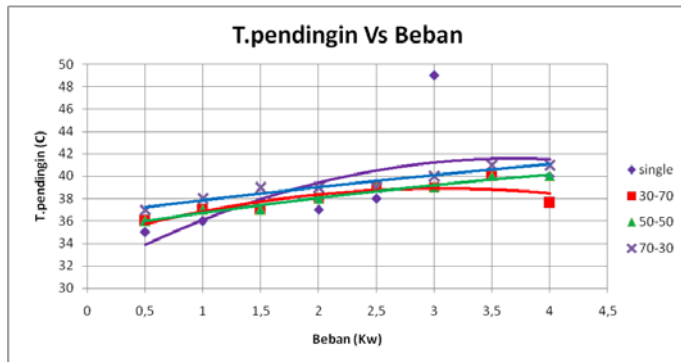
pendingin cenderung naik pada variasi single dibandingkan injeksi bertingkat. Hal ini diakibatkan karena pada proses kerja terjadi proses penginjeksian bahan bakar secara bertingkat didalam ruang bakar, sehingga pada variasi injeksi bertingkat mampu menurunkan temperatur mesin, pelumas dan pendingin terhadap injeksi satu tingkat.



Gambar 4.16 Grafik T.Engine vs Beban



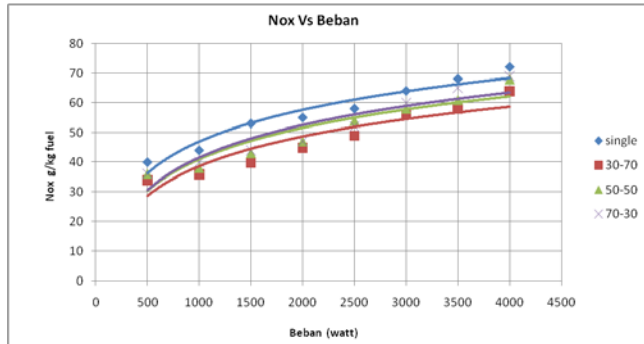
Gambar 4.17 Grafik T.pelumas vs Beban



Gambar 4.18 Grafik T.Pendingin vs Beban

h. Emisi Gas Buang Nox

Gambar grafik Nox Vs Beban dibawah dapat dilihat bahwa pembakaran pada injeksi satu tingkat menghasilkan Nox tertinggi. Laju kenaikan fraksi massa Nox terendah terdapat pada injeksi bertingkat 30%-70%. Pada proses pembakaran,formasi Nox akan terbentuk pada temperatur yang tinggi sehingga untuk menguranginya dapat dilakukan dengan mengurangi akumulasi injeksi bahan bakar bertingkat. Penurunan emisi Nox untuk injeksi bertingkat 70%-30%, 50%-50%, dan 30%-70% secara berturut-turut yaitu sebesar 5,13%, 6,13% dan 9% dibanding dengan injeksi satu tingkat.



Gambar 4.19 Grafik Nox Vs Beban

Dengan distribusi temperatur yang rendah menyebabkan terbentuknya emisi Nox pun menjadi rendah. Hal ini bisa disebabkan oleh adanya *dwel time* antara injeksi tahap pertama dan injeksi tahap kedua pada injeksi bertingkat. Adanya *dwel time* memberikan kesempatan kepada bahan bakar yang telah diinjeksikan pada injeksi tahap pertama untuk terbakar lebih sempurna, sebelum kemudian diinjeksikan lagi bahan bakar pada tahap kedua. Sehingga tidak terjadi kenaikan temperatur secara signifikan pada waktu *dwel time* tersebut yang menyebabkan rendahnya emisi Nox yang terbentuk.

BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dan serangkaian pengujian yang dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil eksperimen yang dilakukan dengan variasi injeksi bertingkat mengalami penurunan SFC dan emisi gas buang Nox yang signifikan dibandingkan *single fuel*.
2. Variasi injeksi bertingkat yang mengalami penurunan SFC dan emisi gas buang NOx yang signifikan terjadi pada variasi 30%-70% sebesar 6,36% dan 9% terhadap *single fuel*.
3. Kondisi daya efektif, torsi dan BMEP pada variasi injeksi bertingkat mengalami penurunan pada variasi 30%-70% sebesar 10,91% terhadap *single fuel*.
4. Suhu operasional sistem injeksi bertingkat dibandingkan *single fuel* adalah sebagai berikut:
 - Nilai efisiensi *thermal* pada variasi 30%-70% mengalami kenaikan sebesar 5,52%.
 - Temperatur gas buang pada variasi 30%-70% mengalami penurunan terhadap *single fuel* sebesar 18,56%.
 - Temperatur oli pelumas pada variasi 30%-70% mengalami penurunan terhadap *single fuel* sebesar 0,62%.

- Temperatur mesin pada variasi 30%-70% mengalami penurunan terhadap *single fuel* sebesar 1,25%.
- Temperatur pendingin pada variasi 30%-70% mengalami penurunan terhadap *single fuel* sebesar 1,35%.

5.2. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, saran yang dapat direkomendasikan untuk penelitian selantunya adalah

1. Perlu digunakannya pompa injeksi bahan bakar yang kontinyu agar tekanan penginjeksian tetap terjaga.
2. Perlu adanya sistem pengumpul tekanan bahan bakar yang akan diinjeksikan agar tekanan dapat ditampung dan dapat dikontrol besarnya tekanan.
3. Diharapkan penelitian selanjutnya mampu mengembangkan injeksi bertingkat 6 tingkat agar pembakaran lebih effesien lagi dan sehingga mampu mengurangi emisi gas buang.

DAFTAR PUSTAKA

1. **Knothe, Gerhard** (2004). *"The biodiesel Handbook"*, AOCS Press. Illinois
2. **Suh, Hyun Kyu** (2011). *"Investigations of multiple injection strategies for the improvement of combustion and exhaust emissions characteristics in a low compression ratio (CR) engine"*, Department of Mechanical Engineering, University of Connecticut, Storrs, CT 06269, USA
3. **Nehmer, D. A., & Reitz. R. D.**, (1994). *"Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NOx Emissions"*, SAE Paper 940668.
4. **Sudarmanta, Bambang., Soeharto., Sampurno.**, (2012), *"Karakteristik Unjuk Kerja Sistem Injeksi Beringkat Pada Ruang Bakar Toroidal Dengan Bahan Bakar Biodiesel"*, Jurnal Industri, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya.
5. **Mujib S. M., Sudarmanta, Bambang.**, (2012). *"Karakterisasi Unjuk Kerja Mesin Diamond Type Di 800 Dengan Sistem Injeksi Bertingkat Berbahan Bakar Biodiesel Kemiri Sunan Dengan Perubahan Camshaft Fuel Pump"*, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS Surabaya.
6. **Han, Z., Uludogan, A., Hampson, G. J., & Reitz, R. D.**, (1996), *Mechanism of Soot and NOx Emission Reduction Using Multiple-Injection in a Diesel Engine*, SAE Paper 960633.
7. *Encyclopedia Britannica*,. 4 stroke diesel cycle, www.EncyclopediaBritannica.co.uk
8. **Kawano, D. Sungkono.**, (2011). *"Motor Bakar Torak (Diesel)"*, ITS Press. Surabaya
9. <http://dewod.wordpress.com/2007/11/08/menjadi-bangsa-yang-mandiri-bersama-biofuel/> (8 november 2007)

10. **Mr. Tune Up's Auto Service** 2009. *Injector cut away diagram. Mr. Tune Up's Auto Service*
11. **Denso Automotive Suppliers,.** (2006) *Five times Injection Diesel.*
12. PT. Pgas Solution, Wilayah Surabaya. (2014), Surabaya.
13. **Heywood, J. B.,** (1976). "*Internal Combustion Engine Fundamentals*", McGraw-Hill Book Company, Singapore.
14. **Mathur, M. L., & Sharma, R.P.,** (1980). "*A Course in Internal Combustion Engine*", page 193,3rd Edition, Dhanpat Rai & Son, Delhi.
15. **Sudarmanta Bambang., Soeharto., Sampurno.,** (2012). "*Simulasi Numerik Sistem Injeksi Bertingkat Pada Ruang Bakar Mesin Diesel Caterpillar 3406*", Jurnal Industri, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya.
16. **Choi, C.Y. G.R. Bower dan R.D. Retiz** (1997). *MECHANISMS OF EMISSIONS REDUCTION USING BIODIESEL FUELS*, Engine Research Center, University of Wisconsin Madison.
17. **Kenji Amagi, Yukihiro Hashimoto dan Mastakai Arai** (1998). *Ignition and Combustion Characteristics Of Two – Stage Injection Diesel Spray*, Departement Mechanical System Engineering School, Gunma University Tokyo Japan.

LAMPIRAN

1. Data variasi single fuel (100%)

SINGLE	beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (2,5ml) sec	Temperatur			
							Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0,5	500	2000	220	2,2	166	65	220	58	35	
1	1000	2000	220	4,4	132	67	249	61	36	
1,5	1500	2000	220	6,6	112	68	286	64	37	
2	2000	2000	220	8,8	95	71	328	65	37	
2,5	2500	2000	220	11,6	78	72	370	66	38	
3	3000	2000	220	13,8	68	74	425	67	49	
3,5	3500	2000	220	15,4	60	74	484	68	40	
4	4000	2000	220	17,5	56	76	495	69	40	
							70,875	357,125	64,75	39

Ne	Ne	Mt	Bmep	Sfc	Eff Thermal
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/kw.jam	%
566,08	0,57	8,491	82,464	0,823	11,065
1132,16	1,13	16,982	164,927	0,517	17,597
1698,25	1,70	25,474	247,391	0,407	22,396
2264,33	2,26	33,965	329,854	0,359	25,329
2984,80	2,98	44,772	434,808	0,332	27,414
3550,88	3,55	53,263	517,271	0,320	28,432
3962,57	3,96	59,439	577,245	0,325	27,995
4502,92	4,50	67,544	655,960	0,307	29,692
	2,57	38,73	376,23	0,43375	23,19

eff generator %	eff Transmisi	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (kj/kg)
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00012939	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00016272	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00019177	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00022609	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00027537	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00031586	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00035798	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00038354	39540

2. Data variasi injeksi bertingkat 30%-70%

30-70									
beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0,5	500	2000	220	2,2	167	64	209	57	35
1	1000	2000	220	4,3	158	65	237	58	36
1,5	1500	2000	220	6,3	139	67	268	61	37
2	2000	2000	220	8,4	122	69	306	63	37
2,5	2500	2000	220	11,5	100	72	343	65	38
3	3000	2000	220	13,2	95	74	401	67	39
3,5	3500	2000	220	15,2	74	75	465	68	39
4	4000	2000	220	17,1	75	76	480	69	40
						70,25	338,625	63,5	37,625

Ne	Ne	Mt	Bmep	Sfc	Eff Thermal
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/kw.jam	%
566,08	0,566	8,491	82,464	0,818	11,132
1106,43	1,106	16,596	161,179	0,442	20,585
1621,05	1,621	24,316	236,145	0,343	26,532
2161,40	2,161	32,421	314,861	0,293	31,050
2959,06	2,959	44,386	431,059	0,261	34,843
3396,49	3,396	50,947	494,781	0,240	37,994
3911,11	3,911	58,667	569,748	0,267	34,079
4400,00	4,400	66,000	640,966	0,234	38,857
	2,506	37,72	366,39	0,3707	28,71

eff generator %	eff Transmisi	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (kj/kg)
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00012861	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00013594	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00015452	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00017605	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00021479	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00022609	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00029025	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00028638	39540

3. Data variasi injeksi bertingkat 50%-50%

50-50									
beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0,5	500	2000	220	2,2	155	67	218	57	36
1	1000	2000	220	4,4	135	65	239	60	37
1,5	1500	2000	220	6,8	125	65	275	62	37
2	2000	2000	220	8,5	104	69	309	64	38
2,5	2500	2000	220	11,3	84	71	347	66	39
3	3000	2000	220	13,2	78	73	402	67	39
3,5	3500	2000	220	15,2	69	74	463	68	40
4	4000	2000	220	17,1	66	75	480	69	40
						69,875	341,625	64,125	38,25

Ne	Ne	Mt	Bmep	Sfc	Eff Thermal
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/kw.jam	%
566,08	0,566	8,491	82,464	0,881	10,332
1132,16	1,132	16,982	164,927	0,506	17,997
1749,71	1,750	26,246	254,887	0,354	25,753
2187,13	2,187	32,807	318,609	0,340	26,784
2907,60	2,908	43,614	423,563	0,317	28,759
3396,49	3,396	50,947	494,781	0,292	31,195
3911,11	3,911	58,667	569,748	0,287	31,777
4400,00	4,400	66,000	640,966	0,266	34,194
	2,52	37,96	368,73	0,4148	25,25

eff generator %	eff Transmisi	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (kj/kg)
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00013857	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00015910	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00017183	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00020652	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00025570	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00027537	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00031128	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00032543	39540

4. Data variasi injeksi bertingkat 70%-30%

70-30									
beban (kw)	beban	Putaran (n)	Voltage (v)	Ampere (a)	Waktu Konsumsi (25ml) sec	Temperatur			
						Pelumas	Gas Buang	engine	Pendingin
0,5	500	2000	220	2,1	155	64	215	58	37
1	1000	2000	220	4,2	140	66	238	61	38
1,5	1500	2000	220	6,4	117	67	267	64	39
2	2000	2000	220	8,7	100	70	307	65	39
2,5	2500	2000	220	11,1	81	71	349	66	39
3	3000	2000	220	13,7	75	73	414	66	40
3,5	3500	2000	220	15,6	65	74	474	67	41
4	4000	2000	220	17,7	62	75	484	68	41
						70	343,35	64,375	39,25

Ne	Ne	Mt	Bmep	Sfc	Eff Thermal
Watt	Kw	N.m	Kpa	Kg/kw.jam	%
540,35	0,540	8,105	78,715	0,923	9,862
1080,70	1,081	16,211	157,430	0,511	17,815
1646,78	1,647	24,702	239,894	0,401	22,687
2238,60	2,239	33,579	326,106	0,345	26,359
2856,14	2,856	42,842	416,066	0,334	27,241
3525,15	3,525	52,877	513,523	0,292	31,131
4014,04	4,014	60,211	584,741	0,296	30,722
4554,39	4,554	68,316	663,456	0,274	33,249
	2,55	38,35	372,487	0,4320	24,31

eff generator %	eff Transmisi	m bio (kg)	Sg bio	mdot bio (kg/s)	NKB (kj/kg)
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00013857	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00015342	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00018358	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00021479	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00026517	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00028638	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00033044	39540
0,9	0,95	0,0214785	0,86	0,00034643	39540

BIODATA PENULIS



Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara yang dilahirkan pada tanggal 15 Agustus 1992 di Tuban. Provinsi Jawa Timur pendidikan formal yang pernah ditempuh meliputi SDN Sambonggede 2 Tuban, SMPN 4 Tuban, SMKN 3 Tuban dengan bidang studi pemesinan penulis pernah mengikuti pelatihan sertifikasi las SMAW 1G-3G di UPPTKT (Unit Pelaksana Pendidikan Tenaga Kerja Tuban). Setelah itu penulis meneruskan pendidikan tingkat perguruan tinggi di Program Studi D3 Teknik Mesin dan mengambil bidang studi manufaktur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2010 dan mengambil pelatihan NDT RI level II di Teknik Perkapalan ITS Surabaya. Selama masa pendidikan baik di perkuliahan penulis aktif berorganisasi, penulis menjabat menjadi Staff Departement KWU 2011-2012, dan menjabat menjadi Sekertaris II 2012-2013 himpunan mahasiswa D3 Teknik Mesin FTI-ITS dan penulis aktif didalam kegiatan organisasi 2012-2013. Penulis pernah melakukan kerja praktek di PT. Semen Gresik Tuban, JawaTimur. Serta penulis melanjutkan lintas jalur dijenjang sarjana di Teknik Mesin ITS pada tahun 2014-2017. Bagi pembaca yang ingin lebih mengenal penulis dan ingin berdiskusi lebih luas lagi dapat menghubungi E-mail: agussupradian@gmail.com.